

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



INGENIERÍA INDUSTRIAL  
PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS  
DE PROCESOS DE CORTE ORTOGONAL CON DISTINTOS  
REDONDEOS DE FILO**

**AUTOR  
DIRECTOR**

**María Ocaña Carrasco  
José Luis Cantero Guisández**

**DEPARTAMENTOS DE INGENIERÍA MECÁNICA**

MARZO 2011



---

## AGRADECIMIENTOS

Parece mentira que haya llegado este momento, al final va a ser verdad eso de que antes o después en esta vida todo llega; muchas gracias a todos los que habéis confiado en mí, porque aunque despacio por fin he llegado a la meta.

Quisiera dar las gracias especialmente a mi padre porque me ha demostrado con creces que siempre está a mi lado, a mi madre por darme toda su fuerza en los momentos más difíciles y a mi hermana por escucharme y animarme en esas tardes de paseo y coca cola.

Un agradecimiento especial para José Ramón, por todo el cariño, tranquilidad y confianza que me ha aportado en estos años.

Igualmente quisiera dar las gracias a todos los compañeros que a lo largo de estos años han pasado por mi vida, especialmente a mis amigos Rubén y Almudena. Gracias por todas esas maravillosas experiencias que hemos vivido juntos.

También quiero dedicar este proyecto a mi tutor, José Luis Cantero, porque sin el todo mi esfuerzo en este trabajo hubiera sido en vano.

---



# ÍNDICE

<b>1. Introducción .....</b>	<b>7</b>
1.1. Motivación.....	7
1.2. Objetivos.....	7
1.3. Estructura del proyecto .....	9
<b>2. Antecedentes .....</b>	<b>11</b>
2.1. Mecanizado.....	11
2.1.1. Fundamentos Arranque de viruta .....	11
2.1.2. Formación de Viruta.....	14
2.1.3. Elección de la Herramienta para Mecanizado .....	18
2.1.4. Corte Ortogonal .....	19
2.2. Rozamiento en el corte .....	24
2.3. Aceros Inoxidables .....	29
2.3.1. Tipos de Aceros Inoxidables .....	29
2.3.2. Designación e Identificación .....	31
2.3.3. Selección Acero Inoxidable.....	32
2.4. Elementos Finitos .....	34
<b>3. Modelo numérico .....</b>	<b>37</b>
3.1. Introducción.....	37
3.2. Constitución del Modelo .....	39
3.2.1. Pre-procesado .....	40
3.2.2. Procesamiento.....	56
3.2.3. Post-procesado.....	57
3.3. Explicación del Modelo.....	57



<b>4. Análisis de resultados .....</b>	<b>61</b>
4.1. Parámetros Analizados .....	61
4.1.1. Espesor de viruta .....	62
4.1.2. Longitud de contacto viruta-herramienta .....	65
4.1.3. Fuerza de Corte.....	67
4.1.4. Fuerza de Avance .....	69
4.1.5. Punto de estancamiento .....	71
4.1.6. Temperatura máxima en la viruta.....	76
4.1.7. Temperatura máxima en la superficie mecanizada.....	78
4.1.8. Temperatura máxima en la herramienta .....	79
<b>5. Conclusiones y líneas de trabajo futuro .....</b>	<b>83</b>
5.1. Conclusiones.....	83
5.2. Líneas de trabajo futuro .....	86
<b>6. Bibliografía.....</b>	<b>87</b>

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Geometría de la herramienta básica .....	42
Tabla 2: Propiedades del Carburo de Wolframio .....	43
Tabla 3: Constantes para el material 316L según modelo J-C .....	45
Tabla 4: Valores del Modulo de Young en función de la temperatura.....	46
Tabla 5: Propiedades del acero AISI 316L ensayado.....	47
Tabla 6: Parámetros del mecanizado .....	50
Tabla 7: Variación relativa del espesor de viruta obtenido en la simulación de de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada.....	63
Tabla 8: Variación relativa del contacto viruta-herramienta obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada .....	66
Tabla 9: Variación relativa de la Fuerza de Corte obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada .....	68
Tabla 10: Variación relativa de la Fuerza de Avance obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada .....	70
Tabla 11: Variación relativa de la Temperatura máxima en zona la viruta obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada .....	77
Tabla 12: Variación relativa de la Temperatura máxima en la superficie mecanizada obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada .....	79
Tabla 13: Variación relativa de la Temperatura máxima en la herramienta obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada .....	82

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Tipos de viruta en función del material .....	17
Figura 2: Diferencia en herramienta con rompevirutas .....	18
Figura 3: Esquema del corte Ortogonal .....	19
Figura 4: Ángulos de corte ortogonal .....	20
Figura 5: Fuerzas en el corte ortogonal .....	22
Figura 6: Comportamiento del rozamiento para un material blando.....	26
Figura 7: Modelo de rozamiento viruta - herramienta en corte ortogonal.....	28
Figura 8: Relación del AISI 304 con los demás aceros inoxidables .....	34
Figura 9: Pantalla de inicio de DEFORM-2D .....	39
Figura 10: Elementos constituyentes del modelo .....	41
Figura 11: Caracterización de la herramienta en DEFORM-2D .....	42
Figura 12: Caracterización de la pieza en DEFORM-2D.....	44
Figura 13: Gráfico Tensión de Fluencia VS Deformación para $T^a=20^{\circ}$ .....	47
Figura 14: Gráfico Tensión de Fluencia VS Deformación para velocidad de deformación nula .....	48
Figura 15: Ejes de coordenadas .....	50
Figura 16: Condiciones impuestas en la pieza para su desplazamiento .....	51
Figura 17: Ventanas para la concentración del mallado en la pieza.....	53
Figura 18: Ventanas para la concentración del mallado en la herramienta.....	53
Figura 19: Fuerza de Corte para Radio 0,05 mm .....	55
Figura 20: Fuerza de Avance para Radio 0,05mm .....	55
Figura 21: Colocación pieza-herramienta para primera pasada .....	58



Figura 22: Fin primera pasada .....	58
Figura 23: Colocación pieza-herramienta para segunda pasada.....	59
Figura 24: Fin segunda pasada .....	59
Figura 25: Valores del espesor de viruta correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo .....	63
Figura 26: Viruta continua correspondiente a la 1ª pasada de herramienta con arista viva.....	64
Figura 27: Viruta serrada correspondiente a la 2ª pasada de la herramienta con redondeo de filo 0,08 mm.....	64
Figura 28: Medida longitud contacto viruta-herramienta.....	65
Figura 29: Valores de la longitud de contacto viruta-herramienta correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo .....	66
Figura 30: Fuerza de Corte correspondiente al caso de arista viva en 1ª pasada ....	67
Figura 31: Valores de la fuerza de Corte correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo .....	68
Figura 32: Fuerza de Avance correspondiente a la 1ª pasada de redondeo de filo 0,05mm.....	69
Figura 33: Valores de la Fuerza de Avance correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo .....	70
Figura 34: Altura del punto de estancamiento correspondiente a redondeo de filo 0,08mm en 2ª pasada .....	71

Figura 35: Desplazamiento máximo del material en la superficie mecanizada correspondiente a redondeo de filo 0,08mm en segunda pasada.....	73
Figura 36: Valores de los desplazamientos correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo .....	74
Figura 37: Valores de los desplazamientos en el eje Y correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo .....	75
Figura 38: Valores comparativos al realizar ambos métodos.....	76
Figura 39: Valores de la Temperatura máxima en la viruta correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo .....	77
Figura 40: Valores de la Temperatura máxima en la superficie mecanizada correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo .....	78
Figura 41: Temperatura máxima en la herramienta correspondiente al caso de redondeo de filo 0,05mm en 2ª pasada .....	80
Figura 42: Evolución Temperatura máxima en la herramienta en la 1ª pasada para el redondeo de filo 0,08mm.....	81
Figura 43: Valores de la Temperatura máxima de la herramienta correspondiente a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo .....	82



# Capítulo I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

En el Departamento de Ingeniería Mecánica se han realizado diversos estudios relativos a la modelización numérica de procesos de corte ortogonal con distintas geometrías de arista de corte.

En este Proyecto se profundiza en el análisis de la influencia del redondeo de la arista de corte en el mecanizado de aceros inoxidables austeníticos. Este aspecto fue tratado en la Tesis Doctoral “Análisis Termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de herramientas en los procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos” [3]. En esta tesis se definió un modelo numérico optimizado y validado experimentalmente para herramientas con redondeo de filo 0,02, 0,05 y 0,08 mm. Una de las conclusiones indicadas en dicha tesis consiste en que la simulación de pasadas sucesivas de corte en los modelos numéricos afecta significativamente a los resultados obtenidos. Las variaciones son especialmente importantes entre los resultados obtenidos en la 1ª y 2ª pasadas. Debido a que en la práctica totalidad de los procesos industriales y ensayos de mecanizado se realizan múltiples pasadas sucesivas, se recomienda simular al menos 2 pasadas de corte en los modelos numéricos.

### 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en analizar el efecto que tiene sobre los resultados de un modelo numérico de Elementos Finitos de corte ortogonal la variación del redondeo del filo de la herramienta. El análisis se ha realizado empleando un modelo numérico de corte del acero inoxidable austenítico AISI 316L basado en el modelo desarrollado, validado y descrito en la referencia [3].

En este trabajo, siguiendo las recomendaciones indicadas en [3], se han simulado 2 pasadas de corte, analizándose las variaciones de los resultados correspondientes a ambas pasadas.

Las principales aportaciones de este Proyecto Fin de Carrera respecto de los resultados mostrados en [3] pueden resumirse en los siguientes puntos:

- El análisis de resultados se realiza en su totalidad para 2 pasadas de corte.
- Se incluye la geometría de filo sin redondeo (arista viva).
- El modelo para varias pasadas sucesivas tiene mayor densidad de mallado (elementos de unos 5 micrómetros).

Otra diferencia a destacar entre el modelo desarrollado en este Proyecto y el modelo de referencia se refiere a la ley de fricción establecida en el contacto entre la herramienta y la viruta. En la referencia [3] se estableció una ley de fricción híbrido variable que ha sido sustituida en este Proyecto por un contacto de tipo Coulomb con coeficiente constante de valor 0,8. Las diferencias entre los resultados obtenidos aplicando ambas leyes de fricción eran poco significativas [3] por lo que se ha considerado adecuado simplificar el modelo en este aspecto.

Por tanto, el modelo desarrollado en este Proyecto no incluye ninguna modificación esencial respecto del modelo establecido en la Tesis [3]. Por otra parte, las diferencias introducidas en este modelo no afectan de forma muy significativa a los resultados obtenidos. Por todo ello, se considera que la validación experimental del modelo tomado como base (descrita en [3]) indica también una adecuada correlación de los resultados obtenidos con el modelo desarrollado en este Proyecto, en relación con los resultados experimentales correspondientes.



## 1.3 Estructura del proyecto

Para la consecución de los objetivos citados anteriormente, se ha decidido estructurar el proyecto como se muestra a continuación:

Capítulo 1: Se realiza una breve introducción al proyecto.

Capítulo 2: se explica de forma teórica los conceptos más importantes relacionados con el proceso de mecanizado, necesarios para la comprensión de este trabajo.

Capítulo 3: se lleva a cabo una descripción detallada del modelo de elementos finitos desarrollado a partir del modelo descrito en [3]. Se indican también las condiciones que se han simulado (geometrías de filo, parámetros de corte, número de pasadas, etc.)

Capítulo 4: Se muestran los resultados del modelo numérico y se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas. Efecto del redondeo de filo. Efecto del número de pasadas.

Capítulo 5: Se indican las principales conclusiones extraídas en base al trabajo desarrollado y las posibles líneas de trabajo futuro en las que podría continuarse.

Capítulo 6: Se muestra la bibliografía empleada para la escritura de este documento.



## Capítulo 2

### 2. ANTECEDENTES

#### 2.1 Mecanizado

En la fabricación por mecanizado se obtienen las dimensiones y la naturaleza superficial deseada de la pieza separando partes del material (virutas) por medios mecánicos y con herramientas de filo. Es el filo de la herramienta el que realiza el arranque de viruta, y según se éste, los procesos de fabricación por arranque de viruta se clasifican en:

- Procesos de arranque con filos geoméricamente determinados, en los que las herramientas arrancan las virutas con filos que tienen formas geométricas determinadas.
- Procesos de arranque con filos no determinados, en los que se arrancan finas virutas con granos abrasivos que no tienen una forma geométrica determinada.

##### 2.1.1. Fundamentos del arranque de viruta

Los procesos de mecanizado se llevan a cabo en máquinas herramienta, utilizando herramientas de corte y elementos de sujeción. En la máquina herramienta se colocan y sujetan las herramientas y las piezas a mecanizar. Las herramientas de corte deben cortar el material en forma de viruta, por lo que es preciso que soporten las fuerzas producidas en el corte y que presenten elevada dureza y resistencia al desgaste. Los elementos de sujeción permiten sujetar la pieza y la herramienta en la máquina.

## **Movimientos en el arranque de viruta**

Para que se produzca el arranque de viruta, deben realizarse movimientos relativos entre la herramienta y la pieza, de forma que se produzca una interacción entre ambas. Los distintos tipos de movimientos que aparecen en un proceso de arranque de viruta son:

1. El movimiento de corte, que es aquel que, sin movimiento de avance, sólo arranca viruta durante una revolución (si el movimiento es circular, como es el caso del torneado o fresado) o durante una carrera (si el movimiento es rectilíneo, como en el caso del cepillado).
2. El movimiento de avance, que, combinado con el de corte, hace posible el arranque continuo de virutas.
3. El movimiento de penetración, que determina la profundidad del corte y, por tanto, el espesor de la viruta que se arranca.

## **Magnitudes de corte y de las virutas producidas**

Se denominan magnitudes de corte o parámetros tecnológicos de corte a los valores que hay que ajustar en el proceso de arranque de viruta para que éste se realice de forma óptima.

### **- Velocidad de corte ( $V_c$ )**

Es la velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte. Se mide normalmente en metros por minuto (m/min). Si es excesivamente baja, la productividad es muy pequeña; si, por el contrario, se trabaja a demasiada velocidad, la herramienta se desgastará rápidamente. Los catálogos de los fabricantes de herramientas indican valores orientativos adecuados para cada material. Depende de múltiples factores, tales como material de la pieza, el material de la herramienta, la sección de viruta, la refrigeración, el tipo de construcción de la máquina, etc.

A partir de este dato ( $V_c$ ) se calculan las revoluciones por minuto ( $n$  en r.p.m.) a las que debe girar la pieza o la herramienta, según sea el proceso, en la máquina. La relación entre  $V$  y  $n$  para los procesos de torneado y fresado es en ambos casos:

$$V_c = \frac{\pi \cdot n \cdot D}{1000} \quad (1)$$

siendo:

$V_c$  = Velocidad de corte en m/min.

$D$  = Diámetro de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado, taladrado) en mm.

$n$  = Revoluciones de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado, taladrado) en un minuto (r.p.m.).

#### - Avance

El avance ( $a$ ) es el desplazamiento relativo herramienta-pieza en cada revolución o carrera. Se expresa en milímetros (mm). Conocidos la velocidad de giro ( $n$  en r.p.m.) y el avance ( $a$  en mm), se calcula la velocidad de avance ( $V_a$ ), que se suele expresar en milímetros por minuto (mm/min). Su cálculo se realiza mediante la expresión:

$$V_a = a \cdot n \quad (2)$$

#### - Profundidad de corte

La profundidad de corte o profundidad de pasada ( $p$ ) es la distancia que penetra la herramienta en la pieza. Se expresa en milímetros.

A partir de la profundidad de corte ( $p$ ) y del avance ( $a$ ) se calcula otra magnitud de corte: la sección de viruta ( $S$ ), que se expresa en milímetros cuadrados ( $\text{mm}^2$ ):

$$S = a \cdot p \quad (3)$$

### **2.1.2. Formación de viruta**

El torneado ha evolucionado tanto que ya no se trata tan solo de arrancar material a gran velocidad, sino que los parámetros que componen el proceso tienen que estar estrechamente controlados para asegurar los resultados finales de economía, calidad y precisión.

La forma de tratar la viruta se convierte en un proceso complejo, donde intervienen todos los componentes tecnológicos del mecanizado, para que pueda tener el tamaño y la forma que no perturbe el proceso de trabajo. Si no fuera así se acumularían rápidamente masas de virutas largas y fibrosas en el área de mecanizado que formarían madejas enmarañadas e incontrolables.

La forma que toma la viruta se debe principalmente al material que se está cortando y puede ser de material dúctil y también quebradiza y frágil.

Al observar la formación real de virutas bajo distintas condiciones de corte, se ven desviaciones apreciables del modelo ideal.

Una viruta posee dos superficies: una en contacto con la cara de la herramienta (cara de ataque) y otra de la superficie original de la pieza. La cara de la viruta hacia la herramienta es brillante o bruñida, y ello se debe al frotamiento de la viruta al subir por la cara de la herramienta. La otra superficie de la viruta no se pone en contacto con cuerpo alguno. Esta superficie posee un aspecto rasgado y áspero, que se debe al propio proceso de corte.

El tipo de viruta está determinado primordialmente por:

- a) Propiedades del material a trabajar.
- b) Geometría de la herramienta de corte.
- c) Condiciones de corte (profundidad de corte, velocidad de avance y velocidad de corte).





En general, es posible diferenciar inicialmente tres tipos de viruta:

### **1) Viruta continua:**

La viruta continua se suele formar con materiales dúctiles a grandes velocidades de corte y/o grandes ángulos de ataque.

Aunque en general producen buen acabado superficial, las virutas continuas no siempre son deseables, en especial en las máquinas herramientas controladas por ordenador que son habituales hoy en día. Tienden a enredarse en el portaherramientas, los soportes y la pieza, así como en los sistemas de eliminación de viruta, y se debe parar la operación para apartarlas.

Este problema se puede aliviar con los rompevirutas, y cambiando los parámetros, como la velocidad de corte, el avance y los fluidos de corte.

### **2) Viruta escalonada o segmentada:**

Las virutas escalonadas (también denominadas virutas segmentadas o no homogéneas) son semicontinuas, con zonas de baja y alta deformación cortante.

Los metales con baja conductividad térmica y resistencia que disminuye rápidamente con la temperatura, como el titanio, muestran este comportamiento. Las virutas tienen un aspecto de viruta serrada.

### **3) Viruta de borde recrecido o acumulado:**

Una viruta de borde acumulado consiste en capas de material de la pieza que se depositan en forma gradual sobre la herramienta (de aquí el término acumulada).

La viruta puede formarse en la punta de la herramienta durante el corte. Al agrandarse, esta viruta se hace inestable y finalmente se rompe. Parte del material de la viruta es arrastrado por el lado que ve a la herramienta, y el resto se deposita al azar sobre la superficie de la pieza.

El proceso de formación y destrucción del borde acumulado se repite en forma continúa durante la operación de corte, a menos que se tomen medidas para eliminarlo.

El borde acumulado se observa con frecuencia en la práctica. Es uno de los factores que afecta de manera más adversa al acabado superficial en el corte. De hecho, un borde acumulado cambia la geometría del filo de corte.

A medida que aumenta la velocidad de corte disminuye el tamaño del borde acumulado; de hecho, puede no formarse.






La tendencia a la formación de borde acumulado se reduce también con cualquiera de los siguientes métodos: disminuir la profundidad de corte; aumentar el ángulo de ataque; usar un buen fluido de corte.

#### **4) Viruta discontinua:**

Las virutas discontinuas consisten en segmentos que pueden fijarse, de forma firme o floja, entre sí. Se suelen formar bajo las siguientes condiciones:

- Materiales frágiles en la pieza, porque no tienen la capacidad para absorber las grandes deformaciones constantes que se presentan en el corte.
- Materiales de la pieza que contienen inclusiones e impurezas duras.
- Velocidades de corte muy bajas o altas.
- Grandes profundidades de corte.
- Ángulos de ataque bajos.
- Falta de un fluido de corte eficaz.
- Baja rigidez de la máquina de la herramienta.

Por la naturaleza discontinua de la formación de virutas, las fuerzas varían en forma continua durante el corte. En consecuencia, adquieren importancia la rigidez del portaherramientas y de los sujetadores de la pieza, así como de la máquina herramienta, cuando se forman virutas discontinúas o escalonadas.

MATERIALES	VIRUTAS
ACEROS SUAVES	
ACEROS SEMIDUROS	
ACEROS EXTRADUROS	
FUNDICIÓN BRONCE	
ALEACIONES DE ALUMINIO	

**Figura 1:** Tipos de viruta en función del material.

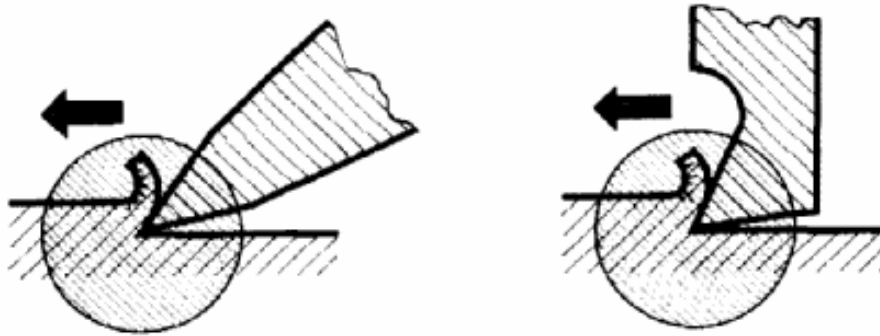
El avance con el que se trabaje y la profundidad de pasada, son bastante responsables de la forma de viruta, y cuando no se puede controlar con estas variables hay que recurrir a elegir la herramienta que lleve incorporado un rompevirutas eficaz.

Las virutas largas y continuas son indeseables, porque constituyen un riesgo potencial de seguridad, tienden a enredarse e interferir con las operaciones de corte.

Si todas las variables independientes de maquinado están bajo control, el procedimiento normal para evitar esta viruta continua es romperla en forma intermitente con un rompevirutas.

Aunque el rompevirutas ha sido por tradición una placa de metal fija a la cara de ataque de la herramienta que dobla la viruta y la rompe, la mayor parte de las herramientas de corte poseen características incorporadas de rompevirutas, con distintos diseños de insertos individuales.

También se pueden romper las virutas debido a la geometría de la herramienta, controlando así el flujo.



**Figura 2:** Diferencia en herramienta con rompevirutas.

### 2.1.3. Elección de la Herramienta para Mecanizado

En el torno moderno y debido al alto coste que tiene el tiempo de mecanizado, es de vital importancia hacer una selección adecuada de las herramientas que permita realizar los mecanizados en el menor tiempo posible y en las condiciones de precisión y calidad requeridas.

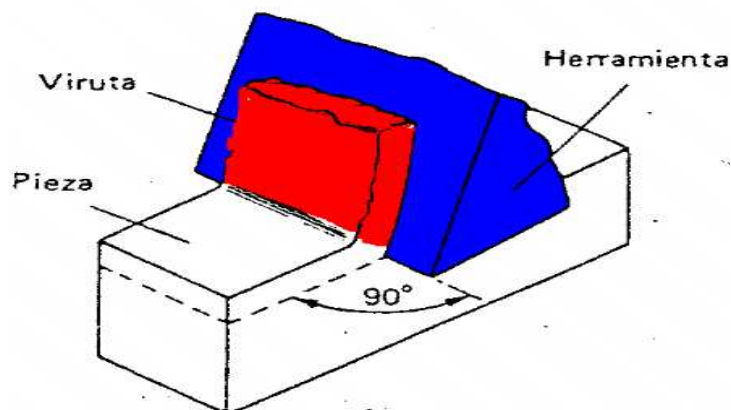
Factores de selección para operaciones de torneado:

- **Diseño y limitaciones de la pieza.** Tamaño, tolerancias del torneado, tendencia a vibraciones, sistemas de sujeción, acabado superficial, etc.
- **Operaciones de torneado a realizar:** Cilindrados exteriores o interiores, refrentados, ranurados, desbaste, acabados, optimización para realizar varias operaciones de forma simultánea, etc.
- **Estabilidad y condiciones de mecanizado:** Cortes intermitente, voladizo de la pieza, forma y estado de la pieza, estado, potencia y accionamiento de la máquina, etc.

- **Disponibilidad y selección del tipo de torno:** Posibilidad de automatizar el mecanizado, poder realizar varias operaciones de forma simultánea, serie de piezas a mecanizar, calidad y cantidad del refrigerante, etc.
- **Material de la pieza:** Dureza, estado, resistencia, maquinabilidad, barra, fundición, forja, mecanizado en seco o con refrigerante, etc.
- **Disponibilidad de herramientas:** Calidad de las herramientas, sistema de sujeción de la herramienta, acceso al distribuidor de herramientas, servicio técnico de herramientas, asesoramiento técnico.
- **Aspectos económicos del mecanizado:** Optimización del mecanizado, duración de la herramienta, precio de la herramienta, precio del tiempo de mecanizado.

#### 2.1.4. Corte Ortogonal

Para comprender el proceso del arranque de material se analizará el caso más simplificado, el de corte ortogonal, en el que el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección del desplazamiento relativo herramienta-pieza.



**Figura 3:** Esquema del corte Ortogonal.

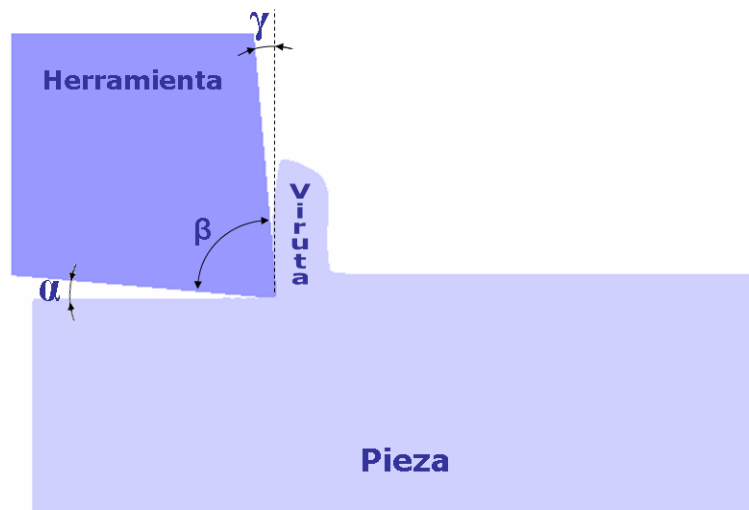
## Ángulos en el corte ortogonal

Los elementos importantes de una herramienta en el corte ortogonal son:

- El filo o arista cortante.
- La superficie de ataque o de desprendimiento, que es la cara de la herramienta sobre la que desliza el material desprendido.
- La superficie de incidencia, que es la cara de la herramienta que queda frente a la superficie trabajada de la pieza.

Los ángulos que definen la posición de las superficies anteriores son:

- Ángulo de incidencia ( $\alpha$ ), formado por la superficie de incidencia y el plano que contiene al filo y a la velocidad de corte.
- Angulo de filo o herramienta ( $\beta$ ), formado por las superficies de incidencia y desprendimiento.
- Angulo de desprendimiento ( $\gamma$ ), formado por la superficie de desprendimiento y el plano normal a la velocidad de corte y que contiene al filo.



**Figura 4:** Ángulos de corte ortogonal.

Si el ángulo de incidencia es muy pequeño, el contacto con la pieza aumenta, por lo que produce un roce excesivo, un aumento de temperatura y, en consecuencia, un desgaste más rápido de la herramienta. Por el contrario, si es demasiado grande, se debilita el filo. La elección del ángulo de incidencia correcto se hace en función del material de la pieza y de la herramienta.

Un ángulo de desprendimiento grande hace que la herramienta penetre y corte bien, dando un mejor acabado superficial, pero queda muy debilitado el filo. Un ángulo de desprendimiento pequeño favorece la resistencia de la herramienta, pero la energía consumida y el calentamiento de la herramienta aumentan. En general, el ángulo de desprendimiento más adecuado será el mayor que la herramienta pueda soportar sin romperse. Su elección estará condicionada por la resistencia del material de la herramienta, el material a mecanizar y el avance.

En función del valor del ángulo de desprendimiento, las herramientas de corte se clasifican en herramientas con geometría positiva cuyo ángulo de desprendimiento es mayor que cero (acero rápido...) y herramienta con geometría negativa las que el ángulo de desprendimiento es menor que cero (metal duro...)

### **Fuerzas en el corte ortogonal**

En el corte ortogonal, la fuerza total **F** está contenida en el plano normal al filo de la herramienta.

**F** se descompone según 3 sistemas de fuerzas:

- Dirección del movimiento de corte y avance:  $F_t$  ( $F_c$ ) y  $F_n$  ( $F_a$ ).

$$F_t = F_c = F \cos(\tau - \gamma) \quad (4) \quad \uparrow \gamma \text{ ó } \downarrow \tau \Rightarrow \downarrow F_a/F_c = \tan(\tau - \gamma) \quad (6)$$

$$F_n = F_a = F \sin(\tau - \gamma) \quad (5)$$

- Plano de cizalladura y normal:  $F_s$  y  $F_{sn}$

$$F_s = F \cos(\phi + \tau - \gamma) \quad (7)$$

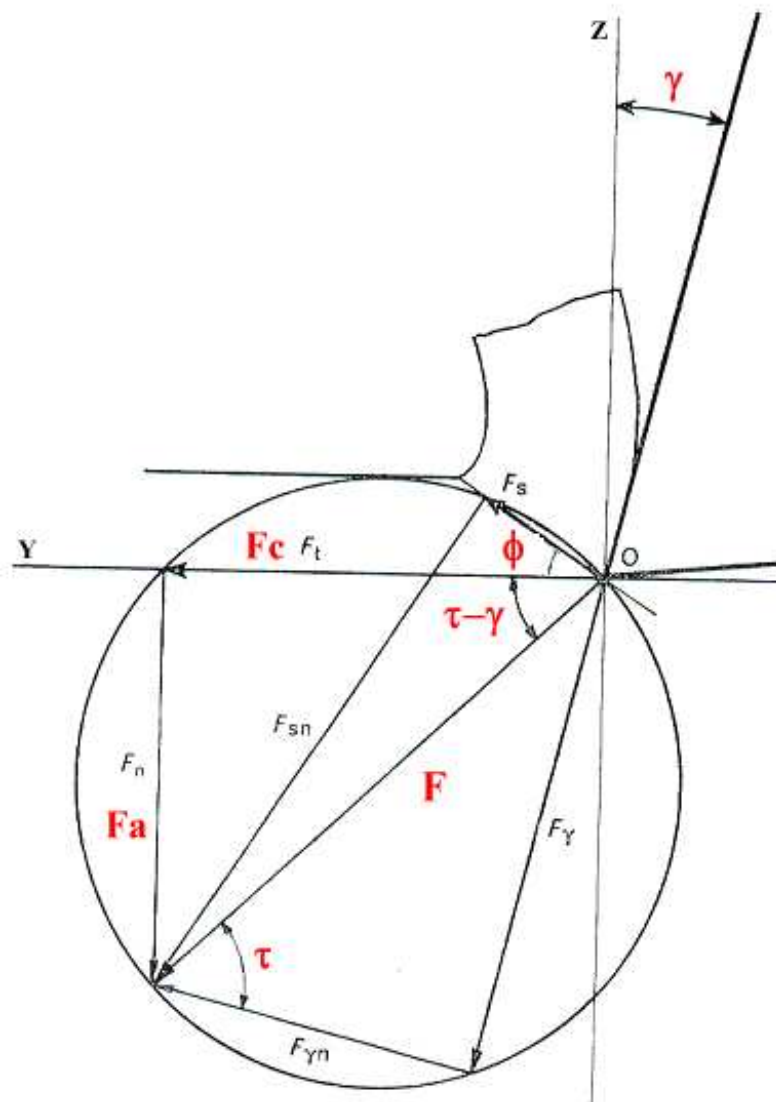
$$F_{sn} = F \sin(\phi + \tau - \gamma) \quad (8)$$

- Superficie de rozamiento virtual- herramienta y fuerza normal:  $F_\gamma$  y  $F_{\gamma n}$

$$F_\gamma = F \sin \tau \quad (9)$$

$$F_{\gamma n} = F \cos \tau \quad (10)$$

$$\text{siendo el coeficiente de fricción } \mu_{roz} = \tan \tau = \frac{F_\gamma}{F_{\gamma n}} \quad (11)$$



**Figura 5:** Fuerzas en el corte ortogonal



## **Temperaturas en herramienta y material**

El arranque de la viruta y el trabajo empleado en su deformación se transforman en calor que provoca elevadas temperaturas en la zona de corte.

Estas elevadas temperaturas afectan al rendimiento de la herramienta y a la calidad de la pieza. Las mayores temperaturas se alcanzan en la superficie de desprendimiento de la herramienta, en zonas cercanas al filo.

Parte del calor generado en el mecanizado se disipa a través del ambiente y fluido de corte en el caso de utilizarse. El resto del calor se evacúa:

- Por la viruta (80%).
- Por la herramienta (15%), interesa que sea rápido.
- Por la pieza (5%), lo evacua bien al tener mucha masa.

El reparto entre estos tres medios de disipación depende de la velocidad de corte, al aumentarla disminuye el porcentaje evacuado por la pieza y herramienta y aumenta el calor evacuado por la viruta, hecho que se considera deseable. Para disminuir la temperatura de la herramienta se aumenta su sección o se refrigera adecuadamente. Esto último se consigue mediante los fluidos de corte, que son capaces de alargar la vida de las herramientas, y conseguir un mejor acabado dado que permiten aumentar la velocidad de corte.

El agua es el mejor refrigerante, pero no un buen lubricante. Si lo primordial es refrigerar, se usa agua con aceites solubles (emulsiones o taladrinas), y si interesa lubricar, aceites de corte. Importante factor es que el líquido sea abundante, continuo y vaya dirigido al punto de contacto herramienta-pieza-viruta.

Además, otras funciones de los fluidos de corte son eliminar las virutas y proteger a la pieza y máquina del óxido. Debe ser una emulsión estable y tener un buen control bacteriológico.

Tipos de aceites de corte: la selección dependerá del tipo de operación, condiciones, material... la clasificación regulada por la DIN 51385 y la ASTM D 2881 es la siguiente:

- Aceites de corte: aceites minerales, poco poder de refrigeración.  
Operaciones severas, con grandes caudales de viruta.
- Taladrinas de aceite solubles: emulsiones de agua y aceites minerales o vegetales. Aspecto lechoso, operaciones de mecanizado medio y ligero.
- Taladrinas semisintéticas: llevan inhibidores de oxidación, bactericidas...
- Taladrinas sintéticas: no incluyen aceite. Refrigeración y control de la corrosión.

El fluido de corte es un elemento que se debe evitar utilizar siempre que sea posible, por razones medioambientales, ya que es altamente contaminante. En la actualidad la tendencia a seguir es el mecanizado en seco.

## 2.2 Rozamiento en el corte

El arranque de viruta se produce por deformación, que llega a crear temperaturas en la herramienta de 600 a 1000 grados centígrados. A su vez, la presión de la viruta sobre la herramienta es enorme, de hasta 1400 Kg/cm<sup>2</sup>.

El calor generado es causado por la deformación del metal (75% aproximadamente) y por la fricción entre la viruta y la herramienta (25%), y este calor es el mayor enemigo de la duración de la herramienta.

El rozamiento entre la viruta y la herramienta durante un proceso de mecanizado corresponde a dos tipos rozamiento, el de Coulomb y el de adhesión.

## - Rozamiento de Coulomb

Incluso la superficie metálica “plana” mejor preparada presenta numerosas crestas y valles. Cuando dos superficies son colocadas juntas, el contacto se establece únicamente entre los picos de unas pocas irregularidades en cada superficie. Si se aplica una fuerza normal, se produce el aplastamiento en las puntas de los relieves que están en contacto, y el área real de contacto  $A_r$ , aumenta hasta que es capaz de soportar la carga aplicada. Para la mayoría de las aplicaciones esta área es solo una fracción del área aparente de contacto  $A_a$  y viene dada por la siguiente expresión:

$$A_r = \frac{N}{\sigma_y} \quad (12)$$

donde  $N$  es la fuerza normal y  $\sigma_y$  el límite elástico del metal más blando.

En estas condiciones el rozamiento es independiente del área aparente de contacto y proporcional a la fuerza normal entre las dos superficies.

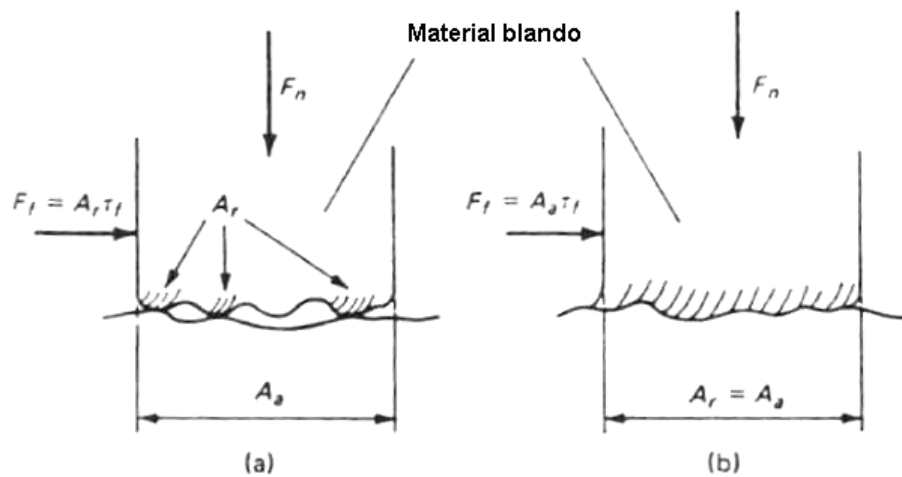
$$F_R = \mu \cdot N \quad (13)$$

Coulomb verificó esta ley y añadió que el coeficiente de rozamiento es esencialmente independiente de la velocidad de deslizamiento.

Este tipo de rozamiento es el que se produce entre la viruta y la superficie de desprendimiento de la herramienta en zonas suficientemente alejadas del filo.

## - Rozamiento por adhesión

En puntos de la superficie de la herramienta cercanos al filo, las altísimas presiones pueden producir que el área real de contacto se aproxime, o llegue a igualar al área aparente ( $A_a$ ). Bajo estas circunstancias se ha alcanzado el valor máximo de  $A_r$  por lo que la fuerza de rozamiento se mantiene constante con independencia de la fuerza normal existente entre viruta y herramienta.



(a) Rozamiento por deslizamiento (b) Rozamiento por soldadura

**Figura 6:** Comportamiento del rozamiento para un material blando.

Las elevadas temperaturas debidas al rozamiento y las presiones ocasionan la formación de microsoldaduras entre viruta y herramienta. Para que se produzca el deslizamiento se requiere una fuerza que produzca el continuo cizallado de las uniones soldadas. La fuerza total de rozamiento  $F_R$  viene por tanto dada por:

$$F_R = \tau_R \cdot A_r \approx \tau_R \cdot A_a \quad (14)$$

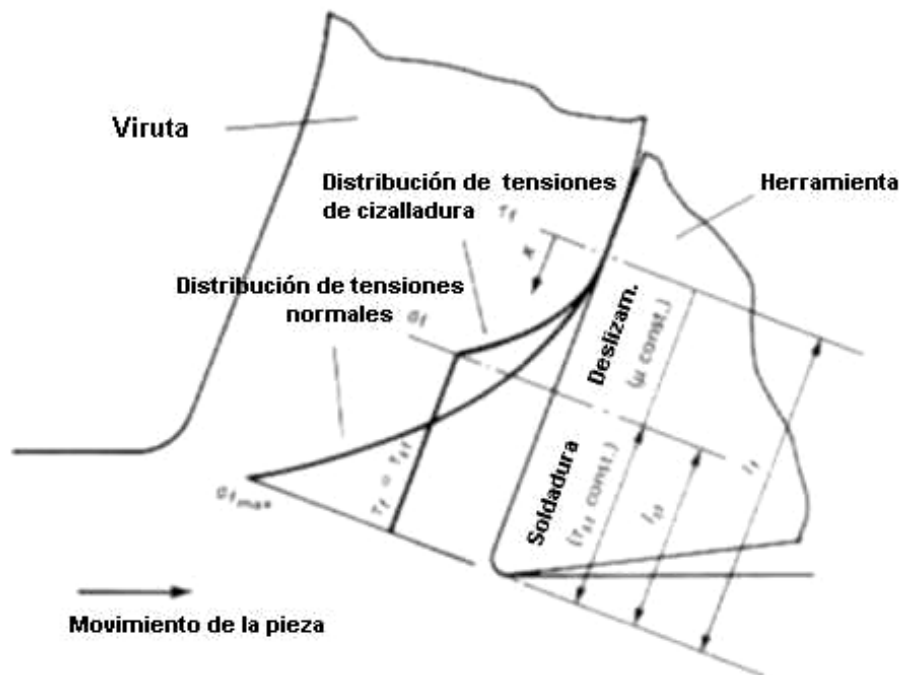
donde  $\tau_R$  es la tensión de cortadura del metal más blando.

Este tipo de rozamiento se denomina por soldadura o adherencia. La existencia del fenómeno de adherencia en los procesos de mecanizado se comprueba observando la superficie interior de la viruta en piezas en las cuales la acción de corte fue interrumpida repentinamente. Esta observación revela que en una zona adyacente al filo de corte de la herramienta, las marcas de rectificado de la cara de la herramienta fueron impresas sobre la superficie de la viruta, indicando que no ha tenido lugar ningún movimiento relativo entre la viruta y la herramienta, y que las áreas real y aparente de contacto son iguales en esta región. Estas observaciones han sido confirmadas ópticamente usando herramientas transparentes de zafiro y fotografías a alta velocidad. El rozamiento por adhesión puede consumir hasta la cuarta parte de la energía de corte.

### **Rozamiento durante el corte**

El estudio del rozamiento durante el proceso de corte en los metales ha conducido al modelo de corte ortogonal con viruta continua y filo no recrecido mostrado en la figura 7.

Se observa que las tensiones normales entre la viruta y la herramienta son suficientemente elevadas para causar que  $A_r / A_a$  se aproxime a la unidad sobre una zona de longitud  $l_{st}$ , adyacente al filo de corte de la herramienta, denominada zona de soldadura. En la longitud  $l_f - l_{st}$ , que se extiende desde el final de dicha zona hasta el punto donde la viruta pierde el contacto con la herramienta, la proporción  $A_r / A_a$  es menor que la unidad, y por lo tanto el coeficiente de rozamiento es constante. A esta región se la denominó zona de deslizamiento.



**Figura 7:** Modelo de rozamiento viruta - herramienta en corte ortogonal.

Cuando está presente el fenómeno de soldadura, el ángulo medio de fricción  $\rho$  sobre la cara de la herramienta dependerá de la forma de la distribución de la presión normal sobre dicha cara, de la longitud de contacto entre viruta y herramienta, de la tensión media de cortadura para el material de la viruta en la zona soldada, y del coeficiente de rozamiento en la zona de deslizamiento.

Un análisis de la distribución de presiones sobre la cara de la herramienta muestra que el ángulo medio de rozamiento depende principalmente de la tensión normal media sobre la superficie de la herramienta. Este resultado explica la influencia del ángulo  $\gamma$  sobre la fuerza de rozamiento, puesto que a medida que se incrementa  $\gamma$ , la componente normal a la herramienta de la fuerza resultante de corte disminuirá, y por tanto la presión normal media disminuirá también.

Cuando se cizallan las microsoldaduras, se arrancan partículas de material de la superficie de la herramienta, que se eliminan junto con la viruta. Esto produce una cavidad en la superficie de la herramienta (desgaste por cráter), que generalmente comienza por encima del filo de corte.

Si se forma un número suficiente de estos puntos de soldadura cerca del filo de corte, ya no pueden ser totalmente cortados de la superficie de la herramienta, y se forma en la cara de la herramienta lo que se conoce por recrecimiento en el filo.

Partes de este recrecimiento en el filo se separan ocasionalmente, y son arrastradas con la viruta. Sin embargo, muchas de estas partículas metálicas también se deslizan por debajo del filo de corte de la herramienta, y permanecen adheridas a la pieza. La consecuencia es un pobre acabado superficial y riesgo de rotura o arranque de partículas en la arista de corte.

## **2.3 Aceros Inoxidables**

Los aceros inoxidable son básicamente aleaciones de hierro-cromo. Otros metales actúan como elementos de aleación, pero el más importante es el cromo (mínimo 12 %), donde su presencia es indispensable para otorgar la resistencia a la corrosión deseada. Los aceros inoxidable son utilizados donde es necesario resistencia a la corrosión, resistencia a altas y bajas temperaturas, resistencia a tracción, ductilidad, apariencia, etc.

### **2.3.1. Tipos de Aceros Inoxidables**

Los aceros inoxidable están divididos en grupos de acuerdo con la micro-estructura básica formada y con la posibilidad de endurecimiento por tratamiento térmico, los grupos principales son los martensíticos, los ferríticos, los austeníticos, los dúplex y los endurecidos por precipitación.

- **Aceros Inoxidables Martensíticos**

Son Aceros aleados al cromo y endurecibles por tratamiento térmico de temple, contienen de un 13 a un 17% de cromo y del 0 al 2% de níquel, su resistencia a la corrosión es más baja que la de los otros tipos y pueden alcanzar hasta 1400 MPa de resistencia a la tracción; los más comunes son: AISI 410, AISI 420 y AISI 440.

- **Aceros Inoxidables Ferríticos**

Son aceros aleados al cromo, (de un 12 a un 30%) que no endurecen significativamente por tratamiento térmico. Son magnéticos y superiores en poder anticorrosión que los martensíticos. Su coste es bajo por no contener níquel. El AISI 430 y el AISI 436 son los más representativos de este grupo.

- **Aceros Inoxidables Austeníticos**

Son aceros no magnéticos, aleados al cromo (16 al 25%) y al níquel (7 al 20%) que solamente endurecen por deformación en frío (endurecimiento mecánico). Son los inoxidable más ampliamente utilizados. Su resistencia a la corrosión es superior a los demás y no son magnéticos aunque pueden adquirir una cierta imantación por deformación en frío.

Los aceros de la serie 300 ( AISI 304, AISI 302, AISI 304L, AISI 310, AISI 316, AISI 316L, AISI 317, AISI 321 y AISI 347) son los más significativos de este grupo, siendo el AISI 304 el más ampliamente usado y representativo.



- **Aceros Duplex**

Son una combinación de los inoxidables austeníticos y de los ferríticos. Los más representativos son el tipo 2205 y el S31803, superiores en resistencia y poder anticorrosivo.

- **Aceros Endurecidos por Precipitación**

Contienen cromo y níquel además de cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Tienen alta resistencia y tenacidad y buena resistencia a la corrosión.

### **2.3.2. Designación e Identificación**

Se usan tres clasificaciones generales:

- Estructura metalúrgica.
- Sistema Unificado, desarrollado por Sociedad americana para Pruebas de Materiales (ASTM) y la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE)
- Sistema AISI (Instituto Americano de la Siderurgia, American Iron and Steel Institute) que establece la clasificación de los aceros inoxidables en los tres grupos siguientes:
  - Aceros austeníticos al cromo-manganeso-níquel, serie 200.
  - Aceros austeníticos al cromo-níquel, serie 300.
  - Aceros ferríticos y martensíticos al cromo solo, serie 400.

Esta unificación se ha llevado a cabo para limitar la multiplicidad de tipos y prescripciones previamente existentes.

### 2.3.3. Selección de un Acero Inoxidable

La selección de un acero inoxidable depende de un grupo de propiedades, debiendo ser considerados los siguientes factores:

- **Resistencia a la Corrosión Química:** agentes corrosivos, concentración, contaminantes, temperatura.
- **Propiedades Mecánicas:** tracción, compresión, torsión, flexión, impacto, etc.
- **Características de Fabricación:** conformabilidad, mecanizado, deformación en frío, soldadura, etc.
- **Características de Acabado:** apariencia, rugosidad, brillo, facilidad de limpieza, facilidad de esterilización, etc.

#### Coste Total

La elección de un acero inoxidable depende de muchos factores, por consiguiente es necesario realizar un balance entre todas sus características para una correcta aplicación.

En este trabajo de investigación se ha elegido el acero inoxidable austenítico por ser el inoxidable más empleado en la industria representando este tipo más del 50% del consumo total de aceros inoxidables. Dentro de este grupo se ha escogido el AISI 316 por ser ampliamente utilizado y por tener un conjunto de propiedades que lo convierten en un acero de alta resistencia.

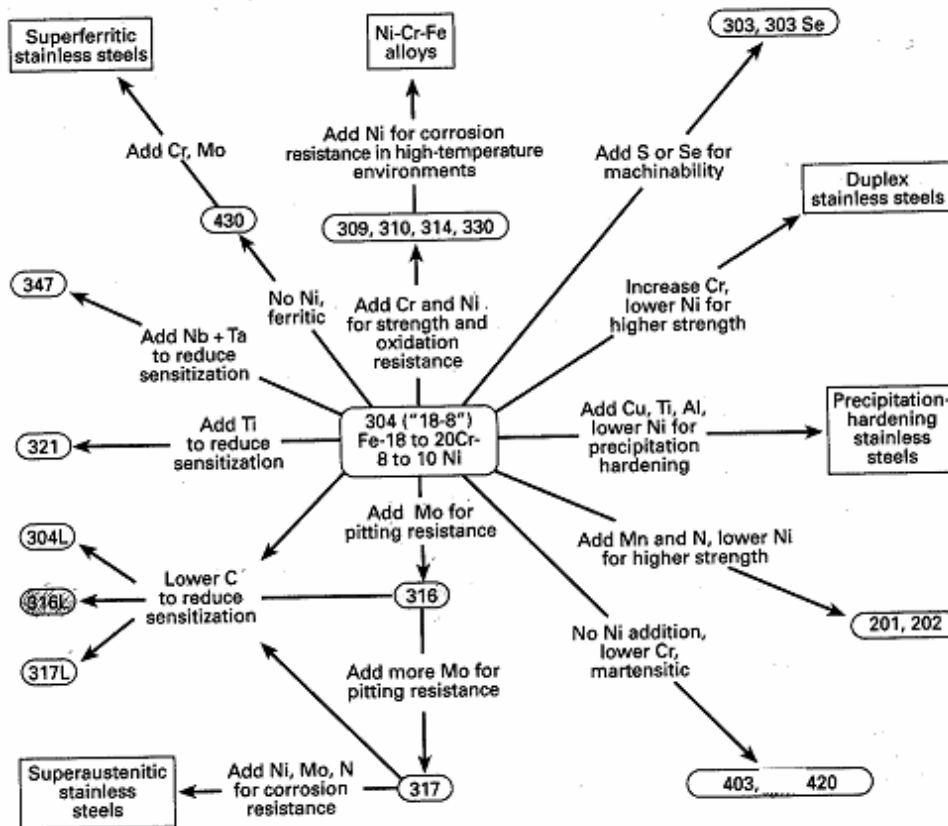
Entre estas propiedades destacan:

- Elevada resistencia a la corrosión.
- Elevada conformabilidad.



- Buenas propiedades mecánicas.
- Elevada resistencia a la fluencia.
- Elevada tenacidad incluso a temperaturas criogénicas.
- Buena resistencia al desgaste.
- Buena resistencia a sollicitaciones por fatiga..
- Características elevadas de deformación en frío.
- Elevada soldabilidad.
- Altas características de higiene.
- Muy baja permeabilidad magnética, aunque aumenta por la deformación en frío.

En la siguiente figura podemos apreciar como el acero más representativo de los aceros inoxidable austeníticos es el AISI 304, y que el AISI 316 es un derivado más resistente de éste. Para proporcionarle al acero AISI 316 esta resistencia extra se le añade Molibdeno (Mo) al AISI 304 obteniendo unas mejores propiedades, por lo que este acero será más caro.



**Figura 8:** Relación del AISI 304 con los demás aceros inoxidable.

## 2.4. Elementos Finitos

El método de elementos finitos se ha convertido en una solución para investigadores y científicos, basado en la discretización de un problema que limita su continuidad a un número determinado de elementos a estudiar, de ahí el nombre de elementos “finitos”.

El método se basa en elegir una unidad concreta y definida a partir de la cual crear un modelo que simule de una manera más o menos acertada el comportamiento de un material, un sistema o cualquier problema físico que se pueda discretizar.

Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica a problemas de transmisión de calor, mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones o de campo electromagnético, con frecuencia en la práctica ingenieril de los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

A través de un ordenador, se resuelven sistemas de ecuaciones diferenciales (constitutivas y de evolución temporal) que el propio programa de elementos finitos asocia al problema que el usuario plantea, a través de parámetros que lo definen unívocamente. Al ser la capacidad de los ordenadores finita, los problemas continuos solo se pueden resolver de manera exacta mediante manipulaciones matemáticas que lo aproximen, lo cual se convierte en una decisión del investigador considerar lo aproximado de su modelo. El problema de modelos demasiado simplificados es que limita sus posibilidades.

El ordenador resuelve estas ecuaciones teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campo. La resolución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza convergencia en la solución. Esta convergencia es un factor extremadamente importante; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

La principal ventaja de un sistema de elementos finitos frente a un prototipo es el ahorro económico y la simplicidad. Sin embargo, estas ventajas tienen un precio a pagar y no es otro que el grado de fiabilidad y fidelidad del modelo de elementos finitos con la realidad o los resultados experimentales que ya existan del proceso procedente de otros estudios. No deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método.

Uno de los principales objetivos de los investigadores una vez que generan un modelo en elementos finitos, consiste en validarlo, esto es, realizar una serie de simulaciones que revelen la proximidad de los resultados con los experimentales. Desde que este método se empezó a utilizar, siempre se ha buscado por los diversos científicos encontrar una solución de compromiso en cuanto a su validación, ya que una vez conseguida una aproximación aceptable el resto de trabajo se simplifica enormemente.

Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero una buena modelización en elementos finitos nos puede acercar más a un modelo óptimo y teórico del fenómeno, con condiciones ideales de las que un prototipo puede no disponer.

## Capítulo 3

### 3. MODELO NUMÉRICO

#### 3.1 Introducción

El software de elementos finitos que se va a utilizar para crear el modelo numérico será el DEFORM<sup>TM</sup> - 2D. Tras crear y definir el modelo en el programa éste se procesará para calcular la evolución de todas las variables que intervienen en el proceso. Una vez procesado se podrán obtener los datos necesarios para el análisis posterior.

El modelo numérico establecido está basado en el modelo de corte desarrollado y validado experimentalmente en la Tesis Doctoral “Análisis Termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de herramientas en los procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos” [3]. Se han introducido algunas modificaciones a dicho modelo, simplificándolo cuando ha sido posible, y buscando un mejor aprovechamiento de la malla para la simulación de 2 pasadas de corte sucesivas. Por otra parte, dicho modelo ha sido adaptado a la geometría de filo con arista viva, no considerada en [3].

El modelo desarrollado en este Proyecto no incluye ninguna modificación esencial respecto del modelo establecido en la Tesis [3]. Por otra parte, las diferencias introducidas en este modelo no afectan significativamente a los resultados obtenidos. Por todo ello, se considera que la validación experimental del modelo tomado como base (descrita en [3]) indica también una adecuada correlación de los resultados obtenidos con el modelo desarrollado en este Proyecto, con los resultados experimentales mostrados en [3].

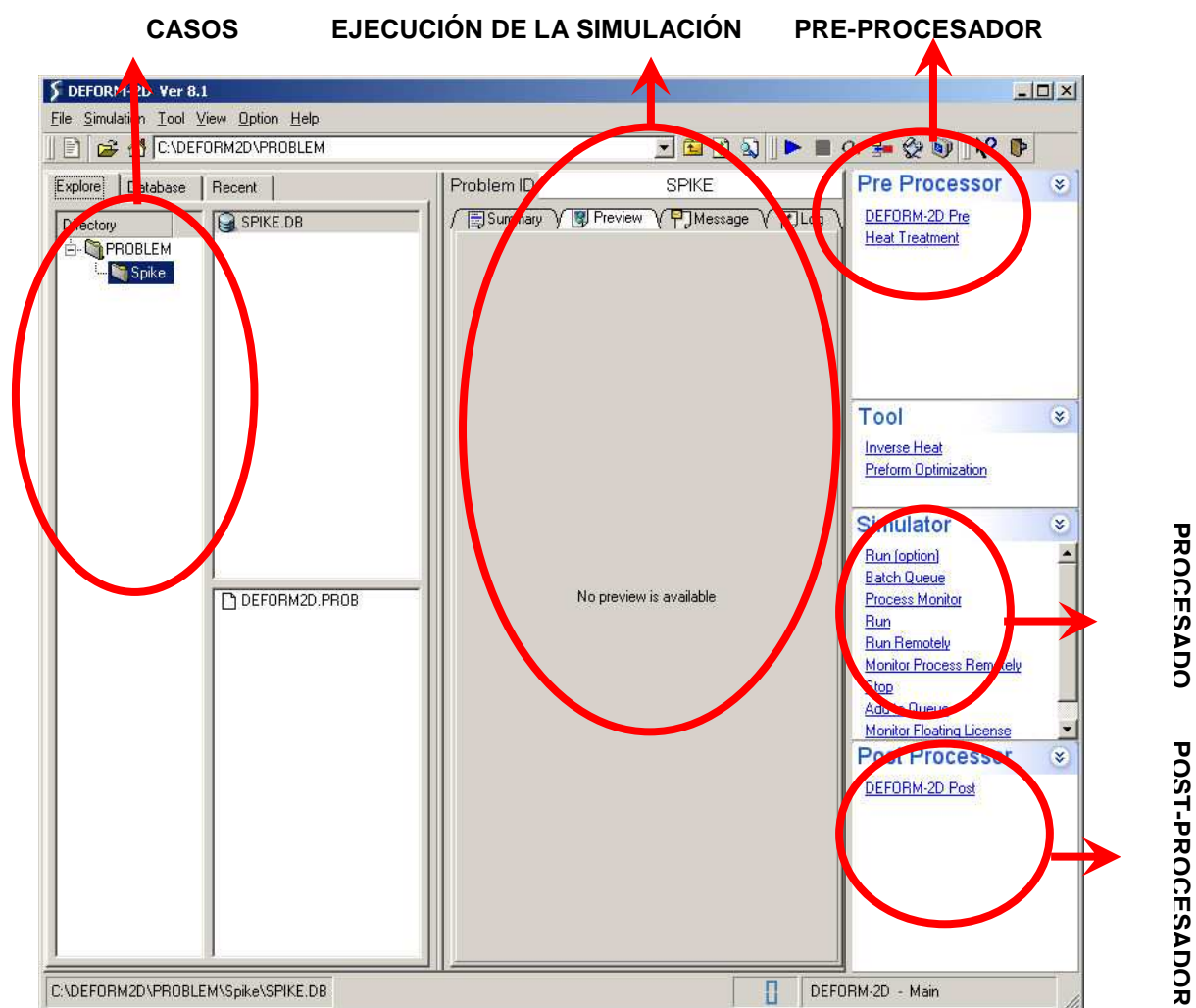
En general, DEFORM2D es un código basado en elementos finitos de formulación Lagrangiana y remallado automático, diseñado para analizar procesos de deformación plástica y de tratamientos térmicos. Al simular estos procesos de fabricación mediante ordenador, esta herramienta permite a los diseñadores reducir el coste y tiempo de los ensayos y prevenir errores en el rediseño de herramientas y procesos.

Cabe destacar que DEFORM2D, al tratarse de un análisis en 2D, asume deformaciones planas, por lo que no considera el flujo del material hacia los lados. En otras palabras el modelo de deformación plana asume un espesor constante, igual a la unidad en la dirección  $z$  (en nuestro caso el mm). Durante la simulación se asume que el objeto se comporta de forma idéntica en toda su sección, tanto en ancho, como en altura. El flujo en todos los planos se considera paralelo a la sección de la pieza. De esta forma es posible emplear modelos bidimensionales. Esta simplificación es especialmente adecuada para modelización de procesos de corte ortogonal con profundidad de pasada significativamente mayor que el avance (se recomienda que la profundidad sea al menos 12 veces mayor).



## 3.2. Constitución del Modelo

La pantalla de inicio del programa (mostrada a continuación), permite el acceso a las diferentes acciones y casos que se ejecutan.



**Figura 9:** Pantalla de inicio de DEFORM-2D.

### 3.2.1. Pre-procesado

En esta etapa se define el problema de mecanizado mediante la introducción de los datos relativos a las condiciones de corte (velocidad de corte, avance, etc), definición de la configuración geométrica de la pieza y de la herramienta de corte, de los materiales, del coeficiente de fricción en las zonas de contacto, del mallado, de las condiciones de contorno y del tiempo de corte.

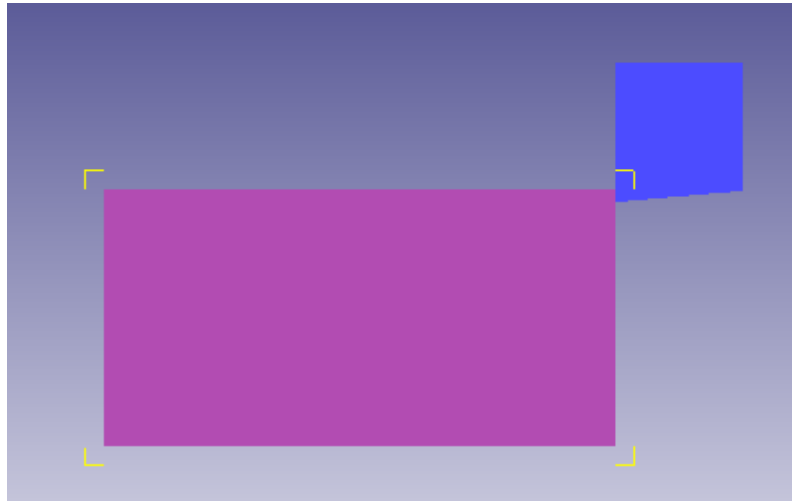
En el preprocesado se definen también los métodos empleados por DEFORM2D para la solución del problema (simulation controls), definición de unidades del sistema, tipo de geometría, el incremento de tiempo por paso, los criterios para la convergencia en el cálculo, y criterio de remallado. También se definen otras condiciones del proceso como la temperatura del ambiente, el coeficiente de convección, etc.

DEFORM2D resuelve problemas no-lineales dependientes del tiempo, generando soluciones a incrementos de tiempo discretos. Cada incremento de tiempo, velocidad, temperatura, entre otras variables presentes en cada uno de los nodos de la malla definida están determinados en base a las condiciones de contorno y propiedades termomecánicas del material de la pieza. El incremento de tiempo por paso se define en función de la cantidad total de pasos simulados, longitud de pieza a mecanizar y velocidad de corte.

DEFORM2D permite realizar simulaciones considerando que el material presenta un comportamiento elastoplástico o exclusivamente plástico. Simulando el comportamiento elastoplástico se considera la recuperación elástica del material y las deformaciones debidas a la expansión térmica. Esto es necesario para el cálculo de tensiones residuales. Estas condiciones requieren un mayor tiempo de cálculo. Por otra parte, al considerar comportamiento elastoplástico, las simulaciones se realizan sin incluir la influencia de la velocidad de deformación a altas temperaturas en las propiedades del material.

## Elementos que constituyen el Modelo

En general, los modelos de mecanizado están formados por dos elementos que son la herramienta y el componente a mecanizar orientados como muestra la siguiente figura:



**Figura 10:** Elementos constituyentes del modelo.

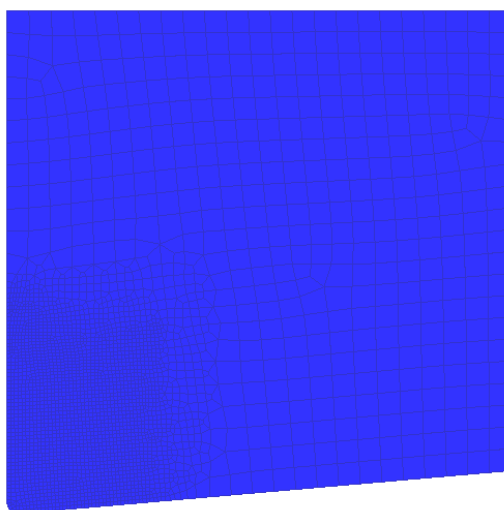
## Caracterización de la Herramienta

Para la herramienta se deben tener en cuenta dos características:

- **Geometría:** En lo que se refiere a la geometría de la herramienta se partirá de una herramienta básica de 1mm por 1 mm con filo nuevo sin ningún tipo de desgaste inicial. Se analizará el caso de arista viva, que aunque no se corresponde con herramientas reales, sí constituye una geometría límite que se emplea en gran cantidad de modelos de la bibliografía, también se estudiarán las herramientas de redondeo 0,02mm, herramienta considerada estándar, y los redondeos de filo 0,05mm y 0,08mm. En la siguiente tabla se muestran los parámetros de la herramienta con geometría básica.

**Tabla 1:** Geometría de la herramienta básica.

Ángulo de desprendimiento	0º
Ángulo de incidencia	5º
Radio de la arista de corte	0,20,50,80 µm



**Figura 11:** Caracterización de la herramienta en DEFORM-2D.

- **Material:** El material utilizado en la herramienta corresponde a un carburo de wolframio (tungsteno) obtenido de la biblioteca del DEFORM 2D V8.1. Este material tiene las propiedades expuestas en la siguiente tabla:

**Tabla 2:** Propiedades del Carburo de Wolframio.

Propiedades Físicas	
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	15,7
Punto de Fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	2800-2870
Propiedades Mecánicas	
Coeficiente de Poisson	0,25
Dureza Rockwell A	90
Módulo de Elasticidad (GPa)	650
Resistencia a la Tracción (MPa)	344

En el caso de la herramienta se considera un modelo rígido ya que en comparación con la pieza a mecanizar su rigidez es mucho mayor y no se le consideran deformaciones.

### Caracterización del material a mecanizar

- **Geometría:** La geometría en este caso se definirá como un rectángulo de 4mm de longitud (correspondiente a la dirección del movimiento de corte) y 2mm de altura (dimensión correspondiente al movimiento de avance). La longitud es suficiente para permitir una longitud de mecanizado que permita la estabilización de las principales magnitudes del mecanizado. La altura asegura que las condiciones de contorno impuestas en la base de la pieza no afectarán a la zona de corte.



**Figura 12:** Caracterización de la pieza en DEFORM-2D.

• **Material:** La modelización del material de la pieza se ha realizado de forma idéntica a la descrita en la Tesis Doctoral referencia de este Proyecto [3]. Se ha empleado una ecuación constitutiva de Johnson-Cook correspondiente al acero AISI 316L, disponible en el código numérico DEFORM y ajustada con los datos proporcionados por el fabricante de los tubos de acero utilizados durante los ensayos. El módulo de Young del material y las constantes termomecánicas asociadas al material se han extraído de la referencia [4].

La formula de Johnson-Cook viene dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_{eq} = (A + B \cdot \epsilon^n) \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\epsilon'}{\epsilon_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}}\right)^m\right)$$

donde  $\varepsilon$  es la deformación plástica,  $\varepsilon_o'$  es la velocidad de deformación ( $s^{-1}$ ),  $T$  es la temperatura de trabajo del material ( $^{\circ}C$ ),  $T_m$  es la temperatura de fusión del material de trabajo ( $1399^{\circ}C$  para el AISI 316L) y  $T_{room}$  es la temperatura de la sala de trabajo. Además las constantes que determinan el comportamiento del material son  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $N$ , y  $M$ . El valor de la constante  $A$  representa el límite elástico a temperatura ambiente a  $1 s^{-1}$ , mientras que  $B$  y  $N$  el efecto de endurecimiento por deformación. El segundo y tercer grupo de la expresión corresponden al efecto debido a la velocidad de deformación y a la temperatura.

Tabla 3: Constantes para el material 316L según el modelo J–C.

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>n</b>	<b>m</b>	<b><math>\varepsilon_o'</math></b>
305	441	0.057	0.1	1.041	1

Se obtienen definidas en [4] las propiedades termomecánicas del material en cuestión, que son las siguientes:

- Densidad ( $kg/m^3$ ):  $\rho_w(T) = 7921 - 0.614 \cdot T + 0.0002 \cdot T^2$
- Conductividad térmica ( $W/(m \cdot K)$ ):  $k_w(T) = 14.307 + 0.0181 \cdot T - 6 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
- Calor específico ( $J/(kg \cdot K)$ ):  $c_{p,w} = 440.79 + 0.5807 \cdot T - 0.001 \cdot T^2 + 7 \cdot 10^{-7} \cdot T^3$

Además los valores del módulo de Young en función de la temperatura serían:

**Tabla 4:** Valores del Modulo de Young en función de la Temperatura.

T	E (mod. Young)
20	210300
150	191700
260	180000
350	191000
425	188200
480	186200
540	156500
650	113700
1200	68000

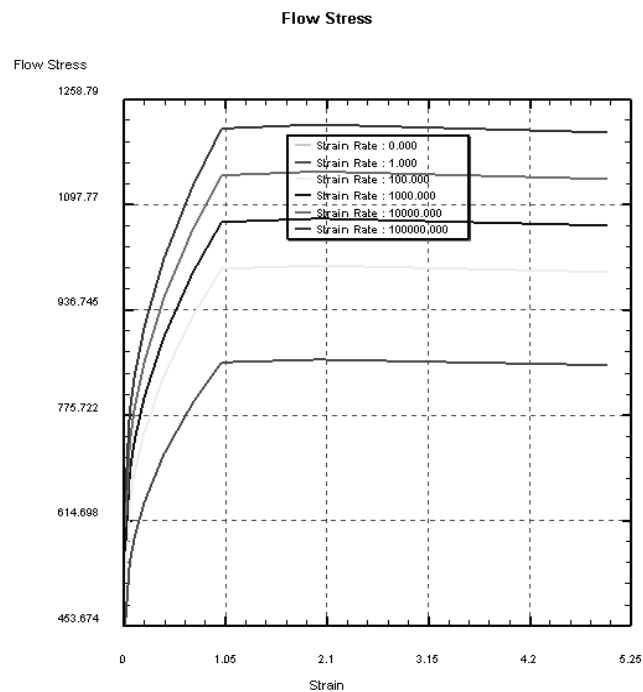
A partir de estos datos y según el modelo Jonson-Cook, se pueden obtener gráficas tensión – deformación como las que se exponen en las Figuras 13 y 14.

En la tabla que se muestra a continuación se encuentran las características del material ensayado en el laboratorio al cual se pretende aproximar el que se puede encontrar en la biblioteca del DEFORM V8.1.

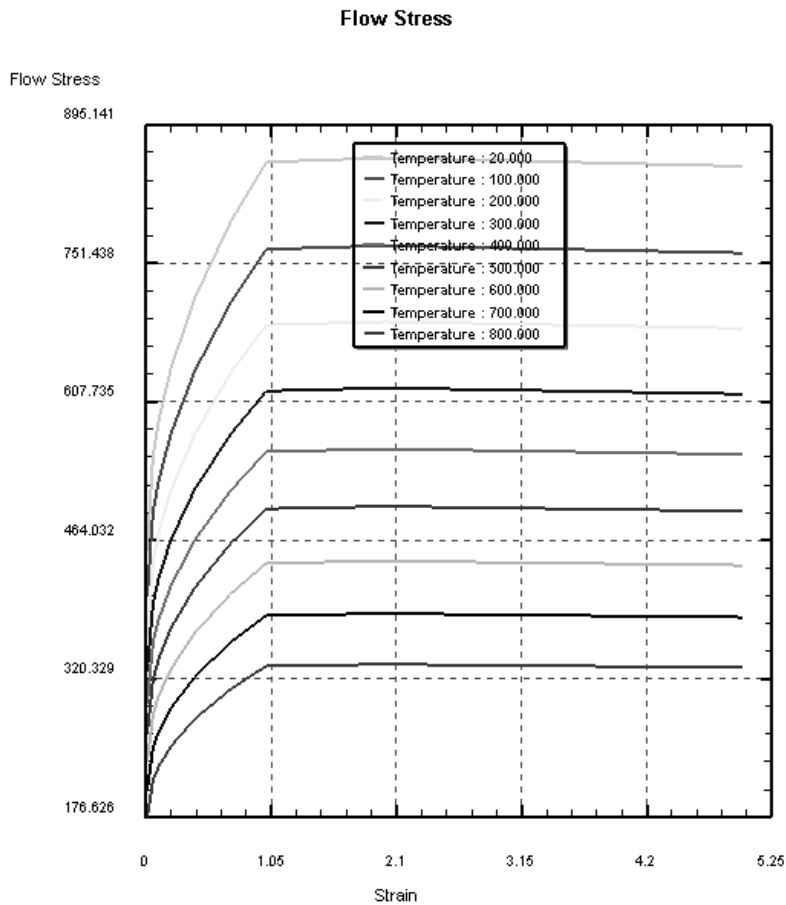


**Tabla 5:** Propiedades del acero AISI 316L ensayado.

Propiedades Físicas	
Densidad ( g cm <sup>-3</sup> )	7,96
Punto de Fusión ( °C )	1370-1400
Propiedades Mecánicas	
Coeficiente de Poisson	0,3
Dureza Brinell	79
Módulo de Elasticidad (GPa)	295
Resistencia a la Tracción (MPa)	567
Alargamiento (%)	60



**Figura 13:** Gráfico Tensión de Fluencia VS Deformación para T<sup>a</sup>=20°.



**Figura 14:** Gráfico Tensión de Fluencia VS Deformación para velocidad de deformación nula.

Para determinar las diferencias en las propiedades mecánicas del material empleado en los ensayos de mecanizado (tubos AISI 316L) y las propiedades correspondientes a la ley constitutiva disponible en la librería de DEFORM2D, se calculó aproximadamente el valor de tensión-deformación ingenieril suponiendo dicha deformación con un valor 2% mayor al de rotura, resultando  $580 \text{ N/mm}^2$  y 58%, respectivamente. Estos valores se adaptan a los términos que se definen en la curva tensión-deformación verdadera, convirtiéndose en  $916,4 \text{ N/mm}^2$  y en 42,7%, respectivamente. El valor de deformación verdadera para este caso corresponde a 0,457.

Interpolando este valor en las curvas del AISI 316L de la librería del DEFORM, se obtiene un valor de tensión de  $730 \text{ N/mm}^2$ , mientras que de acuerdo a los datos concretos proporcionados por el fabricante para el tubo empleado en los ensayos, la tensión correspondiente a la deformación de 0,457 es de  $916,4 \text{ N/mm}^2$ .

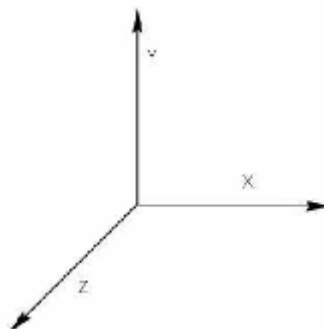
Según la estimación del punto de máxima tensión y de su deformación, se puede deducir que la resistencia a temperatura ambiente y baja velocidad de deformación del AISI 316L utilizado durante los ensayos es entre el 25 y 30% superior al AISI 316L de la librería. Se toma y se extiende a todos los valores de las curvas tensión-deformación del material de la librería un coeficiente de 1,275 (independientemente de la temperatura y la velocidad de deformación).

No se puede certificar la validez de la extensión del coeficiente de 1,275 a todos los rangos de temperatura y velocidad de deformación, dado que su cálculo se ha realizado con los datos disponibles para el lote de tubo ensayado y éstos son sólo a temperatura ambiente.

Según la Tesis Doctoral “Análisis Termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de herramientas en los procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos.” la adaptación del material AISI 316L presente en la librería del DEFORM2D<sup>TM</sup> v. 8.1, con los datos proporcionados por el fabricante de los tubos de 316L utilizados durante los ensayos es una alternativa adecuada para mejorar la correlación de los resultados del modelo numérico en relación con los experimentales.

## Condiciones de Mecanizado

El modelo representado en el software es bidimensional, con deformación plana y con los ejes orientados de la siguiente manera:



**Figura 15:** Eje de coordenadas.

De esta manera, el desplazamiento en el eje horizontal (X) con una cierta velocidad por parte de la herramienta llevará a cabo la acción de corte generando viruta (movimiento de corte). El eje vertical (Y), representará el avance impuesto de mecanizado y el transversal la profundidad del mismo.

Los parámetros que se utilizarán en el torneado serán los que se exponen en la siguiente tabla.

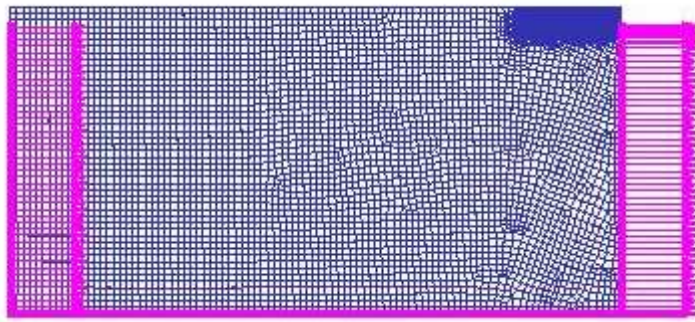
**Tabla 6:** Parámetros del mecanizado.

<b>Velocidad de corte (m/min)</b>	120
<b>Avance (mm/rev)</b>	0,1
<b>Profundidad de pasada (mm)</b>	1
<b>Longitud a mecanizar (mm)</b>	4

## Condiciones de Contorno

Para llevar a cabo la acción de mecanizado, debe imponerse un movimiento relativo entre la herramienta y el componente.

Tal y como se comentó previamente, el movimiento de corte se impone sobre el eje X, asignándole la velocidad de corte al componente según se observa en la Figura 16, y manteniendo una restricción de movimiento en el eje vertical para impedir los desplazamientos en ese sentido.



**Figura 16:** Condiciones impuestas en la pieza para su desplazamiento.

Las condiciones iniciales de trabajo del componente respecto a temperatura, son las ambientales, es decir, 20 °C.

## Mallado

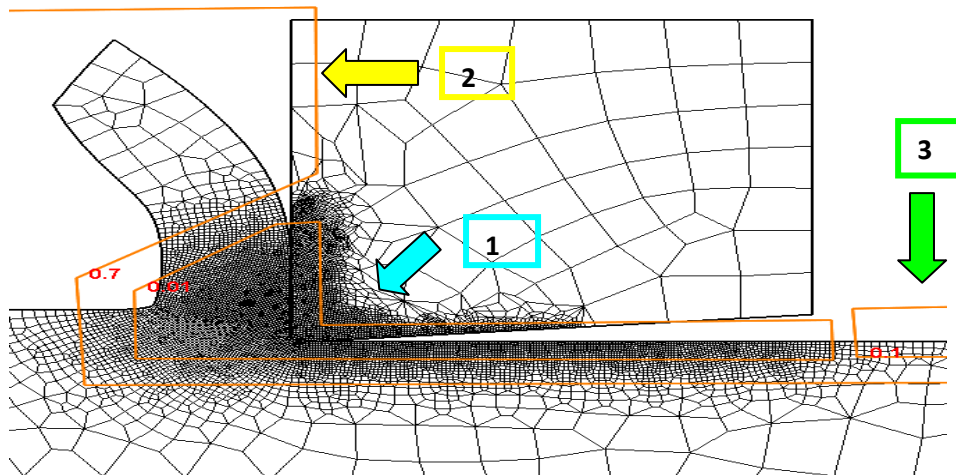
El mallado es un elemento muy importante en una simulación numérica y que es crítico en la obtención de buenos resultados.

Para evitar tener que generar muchos elementos, debido a que estos deben ser muy pequeños, y que el procesamiento del ensayo sea muy largo se concentrarán estos en las zonas de interés, es decir, en aquellas en las que las tensiones y deformaciones sean máximas (zona de corte). De esta forma las zonas menos solicitadas quedarán con un mallado más basto y la zona de corte con un mallado más fino, permitiendo así rentabilizar al máximo la cantidad de elementos empleados. En este caso interesará una zona de mallado mas denso por debajo de la superficie mecanizada en torno a 0.2 mm, en la zona de corte en torno a 0.005 mm, en la superficie mecanizada elementos de aproximadamente 0.01mm y en el resto de la pieza de 0.07mm.

Para conseguir la concentración de los elementos en las zonas deseadas el software DEFORM-2D emplea un sistema de “ventanas”, consistente en el posicionamiento de regiones con diferentes características de mallado.

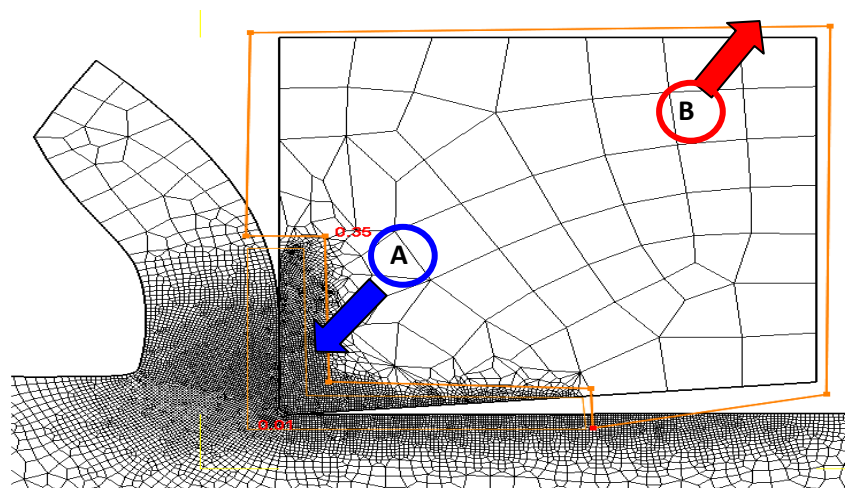
Tal y como se muestra en la figura 17 en la pieza se observan tres ventanas :

- La ventana 1 de mallado fino en la zona de corte y contacto entre la herramienta y el material. Los elementos iniciales en esta zona tienen entre 4 y 5  $\mu\text{m}$  de lado.
- La ventana 2 tiene elementos que aumentan progresivamente hacia los extremos de la pieza y alcanzan dimensiones de hasta 0,2 mm.
- La ventana 3 tiene elementos de 0,02 mm de lado. Esta ventana contempla toda la zona mecanizada de la pieza y tiene una profundidad de 0,04 mm.



**Figura 17:** Ventanas para la concentración del mallado en la pieza.

En la figura 18 se muestran las 2 ventanas de mallado de la herramienta:



**Figura 18:** Ventanas para la concentración del mallado en la herramienta.

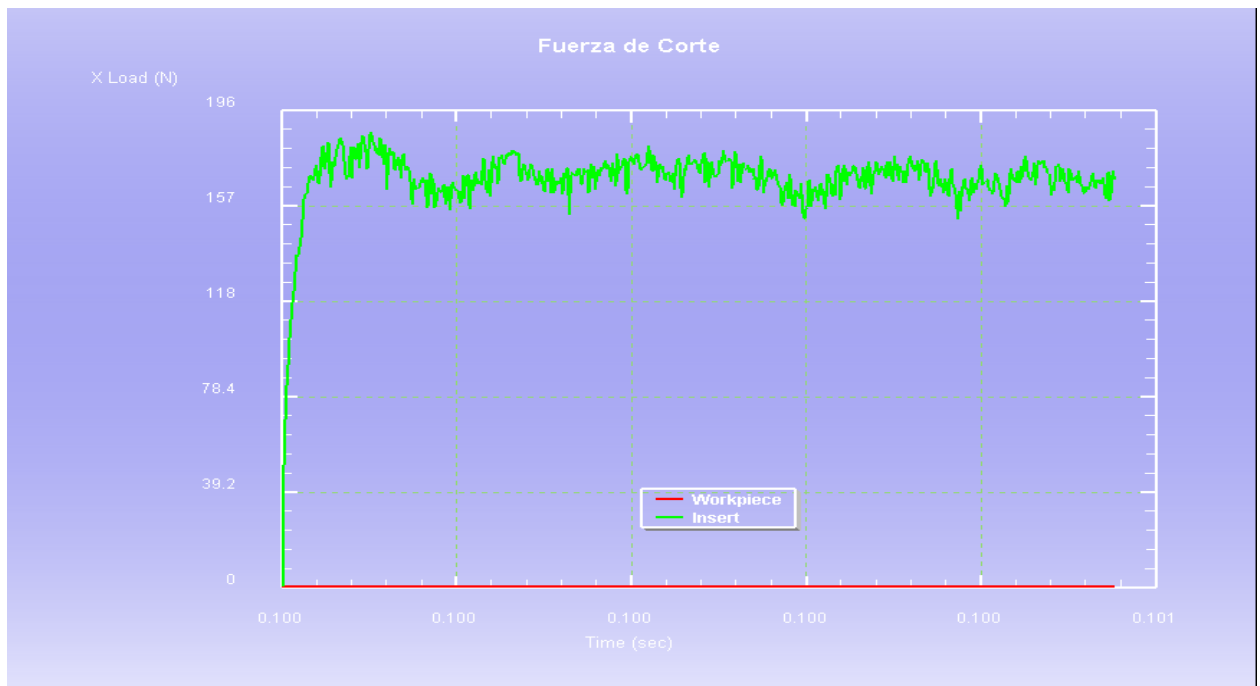
- La ventana A tiene elementos de 5  $\mu\text{m}$ . Dentro de esta ventana se encuentran las zonas de contacto de la herramienta con la pieza.
- La ventana B tiene elementos que aumentan progresivamente desde la ventana A, hasta alcanzar 0,14 mm de lado.

Para seleccionar un número de elementos apropiado se debe alcanzar un compromiso entre tiempo de procesado y precisión de los resultados. En este caso se han utilizado alrededor de 2500 elementos en la herramienta y 10000 en la pieza para realizar la primera pasada y en torno a unos 3000 en la herramienta y 15000 en la pieza para la realización de la segunda pasada.

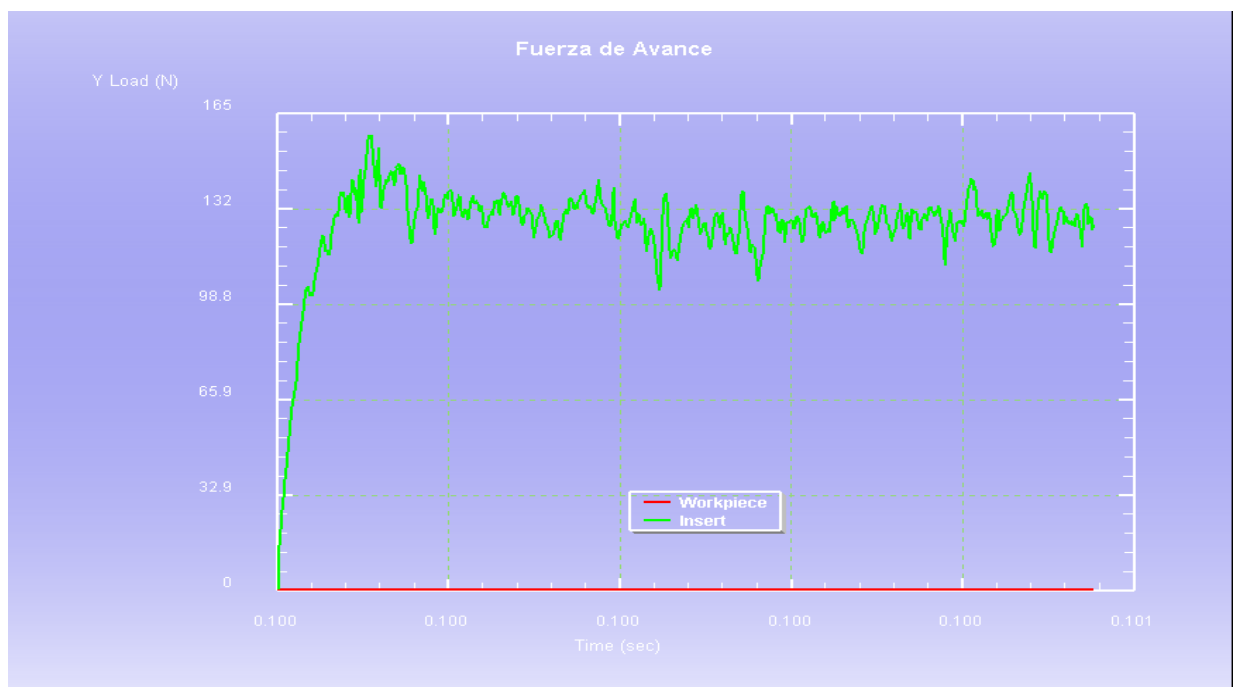
Para comprobar la viabilidad del mallado, se realizaron diferentes pruebas previas para comprobar que a partir de una densidad mínima, los datos arrojados por el programa eran constantes. El tiempo de procesado con este número de elementos ronda las 6 horas.

Una manera de comprobar que todo funciona correctamente es ver que la fuerza de corte y la de avance se estabilizan tal y como se muestra en las siguientes figuras:





**Figura 19:** Fuerza de corte para Radio 0,05mm.



**Figura 20:** Fuerza de avance para Radio 0,05mm.

## Otros Parámetros

Para completar la creación del modelo se deben tener en cuenta unos cuantos parámetros relativos al funcionamiento general del mecanismo de generación de viruta y a requerimientos del programa para su buen funcionamiento:

- La temperatura ambiente de trabajo se considera de 20° C.
- Imponemos en todas las simulaciones que la viruta obtenida no penetre en el material y que el rozamiento pieza-herramienta sea tipo Coulomb con un coeficiente de rozamiento de 0.8.
- Se trabaja con un incremento de tiempo por paso constante y equivalente a  $8.5374 \cdot 10^{-7}$  segundos y por lo tanto con desplazamiento por paso variable.
- El número de pasos será el mínimo necesario hasta que las fuerzas que intervienen en el proceso se estabilicen, de esta forma se evita procesar un gran número de pasos sin fundamento.

### 3.2.2. Procesamiento

En esta etapa se lleva a cabo la simulación del proceso por parte del programa, para después su visualización. Es en esta fase, en la que el software pone a prueba sus cálculos numéricos basándose en condiciones impuestas en el preprocesado.

Además, el programa puede dar ciertos errores en su procesamiento normalmente relacionados con el mallado, ya que éste debe ir adaptándose a una geometría variable sin que se produzca penetración entre los componentes.

El procedimiento que sigue el programa ante esta circunstancia es crear una nueva malla adaptada a la nueva geometría. En el caso en que el programa no sea capaz de este evento, se deberá hacerlo de forma manual.

### **3.2.3. Post-procesado**

En esta etapa se lleva a cabo la presentación de los resultados obtenidos tras la simulación realizada en la fase anterior, lo que permitirá el análisis que se muestra en el siguiente apartado. Esta sección del programa, es la que permite un análisis más exhaustivo de los valores de fuerza de corte obtenidos mediante gráficos que permiten visualizar su evolución. También permiten mostrar la distribución de presiones, temperaturas, tensiones, deformaciones, velocidades de deformación, etc. en el componente a lo largo de todo el proceso de mecanizado, y en una zona específica como puede ser la zona de contacto viruta-herramienta.

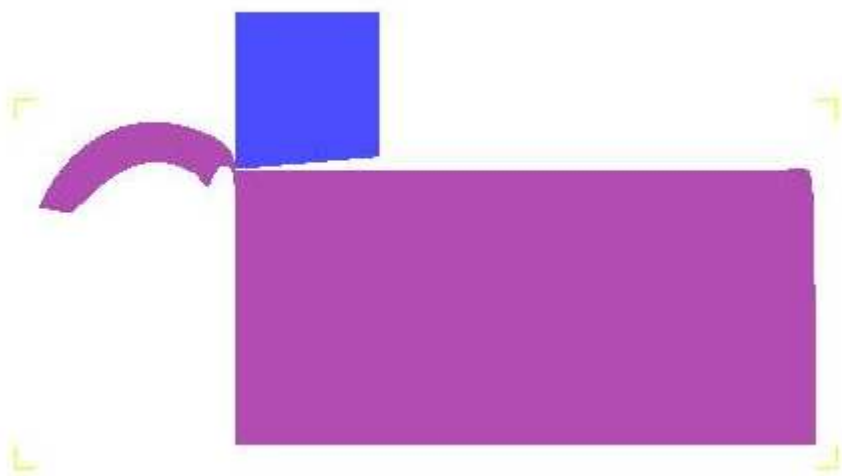
## **3.3. Explicación del Modelo**

Lo primero que se ha hecho ha sido realizar una primera pasada donde se ha simulado el mecanizado completo de la pieza, una vez terminada la simulación se ha retirado la herramienta para después enfriar la pieza durante 0.1 segundos, tiempo coherente con los tiempos normales en los ensayos de validación considerados en [3], seguidamente se ha posicionado la herramienta para realizar la segunda pasada.

A continuación se muestran las figuras más relevantes para una mejor comprensión del estudio realizado:



**Figura 21:** Colocación pieza-herramienta para primera pasada.



**Figura 22:** Fin de primera pasada.



**Figura 23:** Colocación pieza-herramienta para segunda pasada.



**Figura 24:** Fin segunda pasada.



## CAPÍTULO 4

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Parámetros Analizados

Se ha procedido al análisis de los resultados de distintas magnitudes correspondientes a las simulaciones de una y dos pasadas de corte con las distintas geometrías de herramienta consideradas: arista viva y redondeos de filo 0,02mm, 0,05mm y 0,08mm, a las que denominaremos R0, R2, R5 y R8. Para garantizar que los valores de las distintas magnitudes mostrados a continuación son representativos de los resultados del modelo numérico, se obtuvieron valores en varios pasos de la simulación y en distintos nodos del modelo, indicándose los valores medios correspondientes. En todos los casos se ha verificado que no se producían variaciones excesivas entre los distintos resultados obtenidos.

Para cada magnitud considerada, en primer lugar se indicarán las diferencias observadas en los resultados obtenidos al simular 1 ó 2 pasadas de corte. Posteriormente se describirán las tendencias con el redondeo de filo de los resultados obtenidos numéricamente para 1 y 2 pasadas de corte. Como se ha indicado anteriormente, tanto en los procesos de corte industriales, como en los ensayos normalmente empleados para la validación de modelos, se realizan múltiples pasadas de corte. Por ello, los resultados numéricos obtenidos en la simulación de la 2ª pasada de corte son más representativos por corresponderse con condiciones más realistas. No obstante, la mayor parte de los trabajos basados en modelos numéricos de corte únicamente realizan la simulación de una pasada. Por ello, se ha considerado interesante incluir en este trabajo también la descripción de la influencia del redondeo de filo en los resultados numéricos obtenidos en la 1ª pasada de corte.

#### 4.1.1. Espesor de viruta

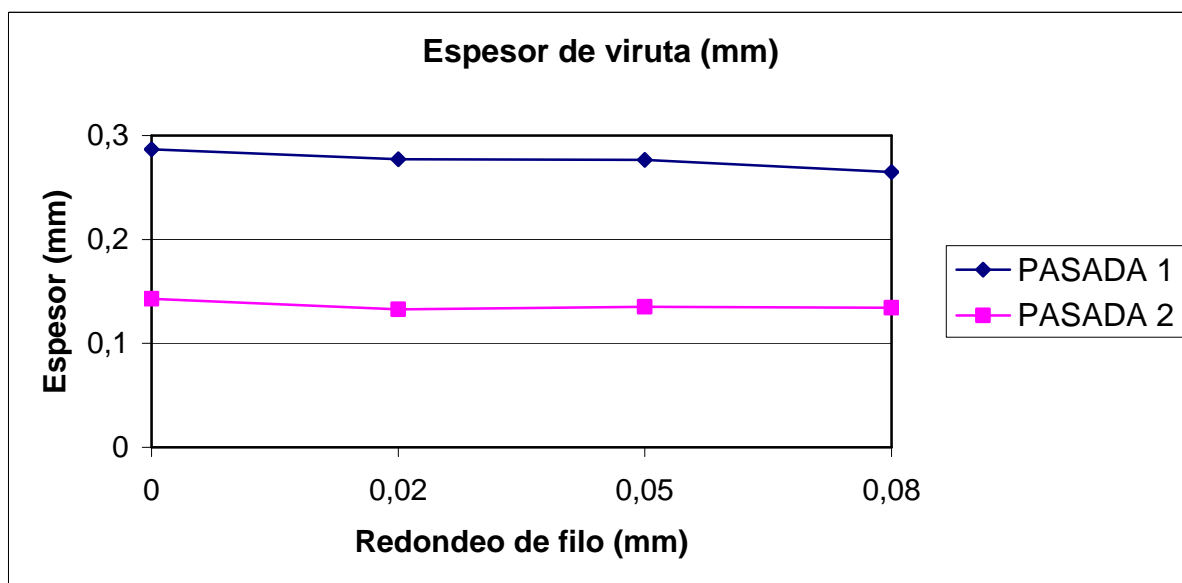
Tal y como se muestra en la figura 25 el espesor de viruta disminuye ligeramente al aumentar el redondeo de filo (disminuciones en torno al 5%). Dicha tendencia se observa en los resultados correspondientes a la 1ª y a la 2ª pasada.

Tal y como indica la tabla 7 los valores del espesor de viruta obtenidos numéricamente se reducen en torno al 50% al simular una 2ª pasada de corte en relación con el medido en la 1ª pasada. Los valores obtenidos en primera pasada para todos los redondeos de filo oscilan en torno a 0,28 mm para arista viva hasta llegar a los 0,26mm de redondeo de filo 0,08mm; en segunda pasada las medidas del espesor son de aproximadamente 0,14mm.

Teniendo en cuenta estos resultados podemos concluir que los valores obtenidos al realizar la primera y la segunda pasada difieren de forma significativa, lo que indica que realizar una única pasada no nos proporcionaría una información certera.

Un punto importante a destacar es que en primera pasada todas las geometrías de corte presentan viruta continua sin embargo en segunda pasada se observa una viruta algo más irregular, especialmente al aumentar el radio del filo. En concreto, en el caso con redondeo 0,08 mm las variaciones en el espesor recuerdan a geometría de viruta serrada (ver figura 27). Para observar este efecto es necesario que el mallado sea suficientemente denso en la zona de corte (tamaño de elementos del orden de 5 micras). En modelos con tamaño de elemento de 10 micras no se observó el efecto de formación de viruta serrada.

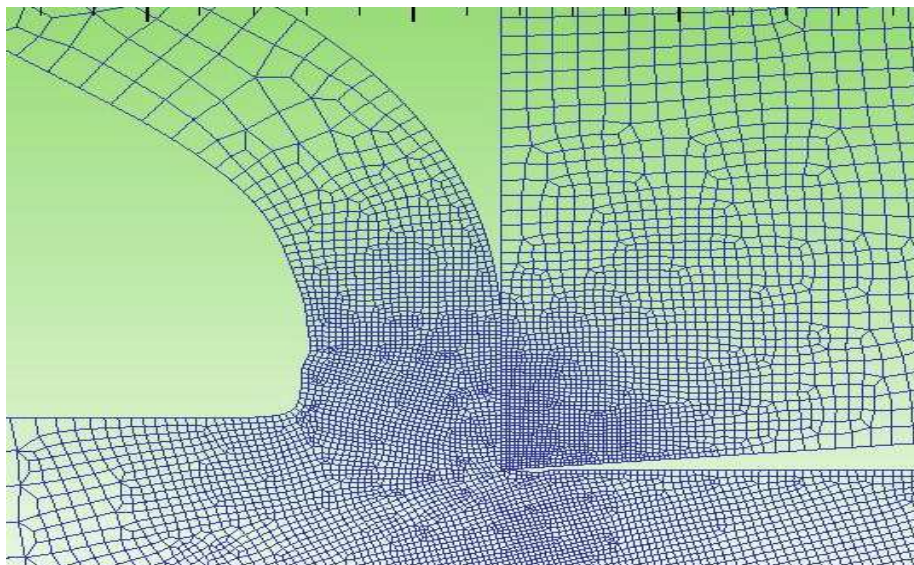




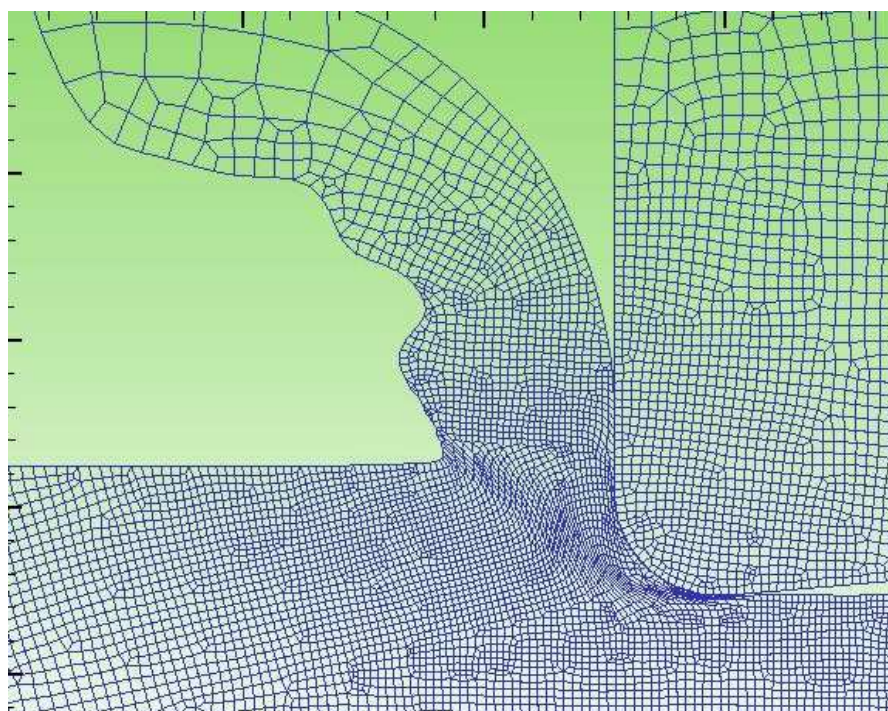
**Figura 25:** Valores del espesor de viruta correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo.

**Tabla 7:** Variación relativa del espesor de viruta obtenido en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada.

Radio de filo	Variación relativa del espesor al realizar 2 pasadas en lugar de 1
<b>R0</b>	-50%
<b>R2</b>	-52%
<b>R5</b>	-51%
<b>R8</b>	-49%



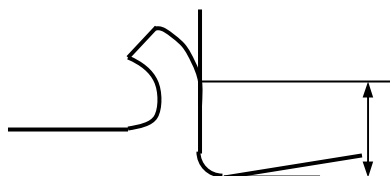
**Figura 26:** Viruta continua correspondiente a la primera pasada en el caso de herramienta con arista viva.



**Figura 27:** Viruta serrada correspondiente a la 2ª pasada de la herramienta con redondeo 0,08 mm.

#### 4.1.2. Longitud de contacto viruta-herramienta

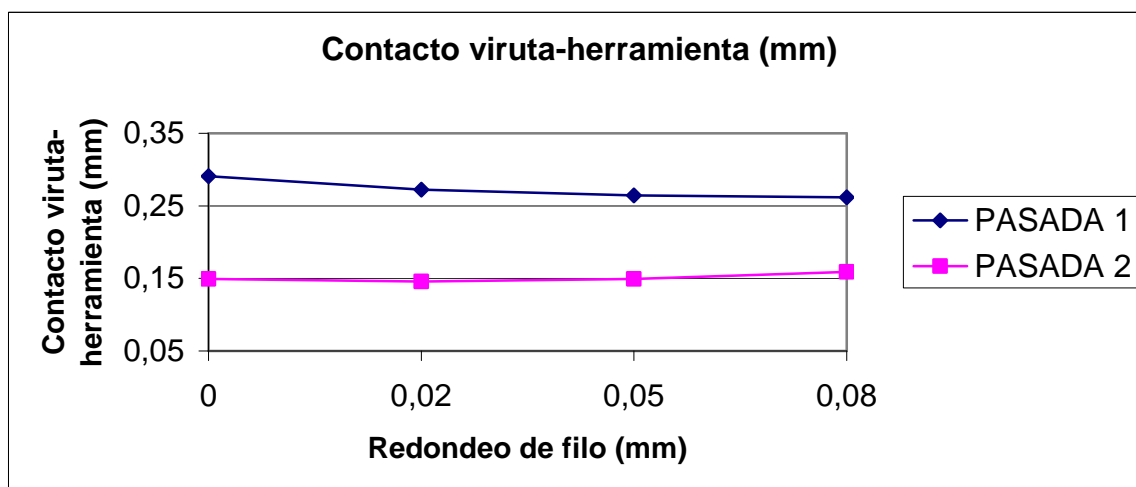
Se ha considerado como longitud de contacto viruta-herramienta a la diferencia de cota entre el punto de tangencia del filo de la herramienta con la dirección del movimiento de corte y el punto de pérdida de contacto de la viruta y la superficie de desprendimiento (ver figura 28). Esta medida de la longitud de contacto es adecuada para realizar análisis comparativos para herramientas con distinto redondeo de filo de forma intuitiva.



**Figura 28:** Medida longitud contacto viruta-herramienta.

Como muestra la figura 29 los valores obtenidos para la primera pasada van disminuyendo ligeramente al aumentar el radio de filo (las diferencias entre los valores oscilan entorno al 8-9%). No se observan variaciones significativas para las simulaciones de segunda pasada.

Tal y como muestra la tabla 8 la diferencia entre realizar una o dos pasadas es importante, valores obtenidos en torno a un 40-50 % mayores en primera pasada; en segunda pasada la viruta es más fina y curvada enseguida toca la pieza, de ahí que se establezca la condición en el programa que la viruta no penetre en la pieza, en primera pasada no existe este problema y la única condición que se establece es un rozamiento de tipo Coulomb con un coeficiente de 0,8.



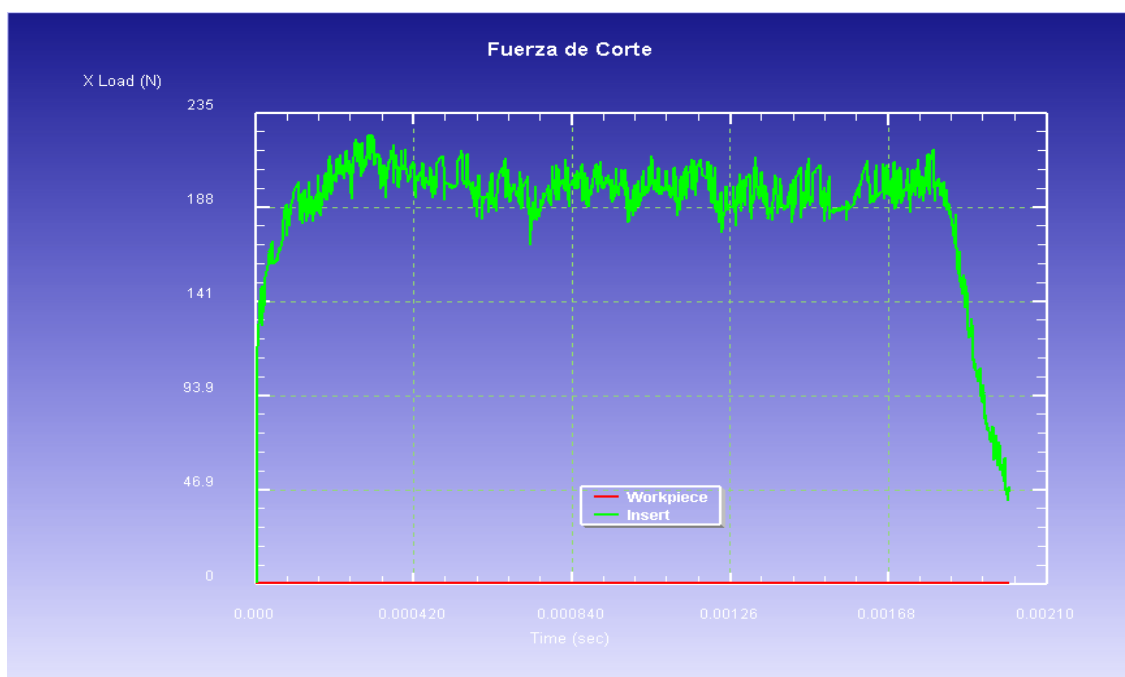
**Figura 29:** Valores de contacto viruta -herramienta correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo.

**Tabla 8:** Variación relativa del contacto viruta-herramienta obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada.

Radio de filo	Variación relativa contacto viruta-herramienta al realizar 2 pasadas en lugar de 1
<b>R0</b>	-48,5%
<b>R2</b>	-46,5%
<b>R5</b>	-43,6%
<b>R8</b>	-39%

### 4.1.3. Fuerza de Corte

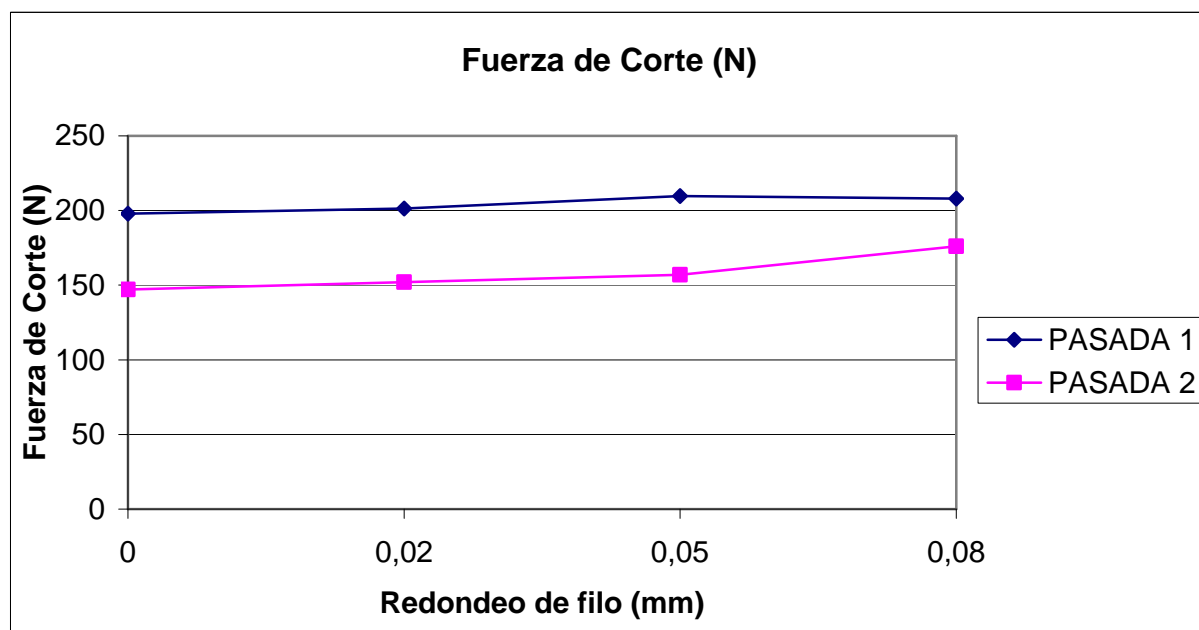
Las Fuerzas de Corte para todos los radios de filo y para ambas pasadas no presentan demasiadas oscilaciones y se estabilizan rápidamente. En la figura 30 se muestra a modo de ejemplo la gráfica correspondiente al caso de arista viva en primera pasada.



**Figura 30:** Fuerza de Corte correspondiente al caso de arista viva en primera pasada.

Según muestra la figura 31 los valores de la Fuerza de Corte aumentan al aumentar el redondeo de filo, siendo este efecto más destacado en el caso de la segunda pasada.

Observando la tabla 9 relativa a la Fuerza de Corte la diferencia de valores obtenidos al realizar una o dos pasadas es aproximadamente un 25% mayor en primera pasada que en segunda para el caso de arista viva, redondeo 0,02mm y 0,05mm. Para el caso de 0,08mm la diferencia entre ambas pasadas es menor (15%), probablemente debido al hecho de que el tipo de viruta cambia a viruta de tipo serrada en la segunda pasada de dicha geometría.



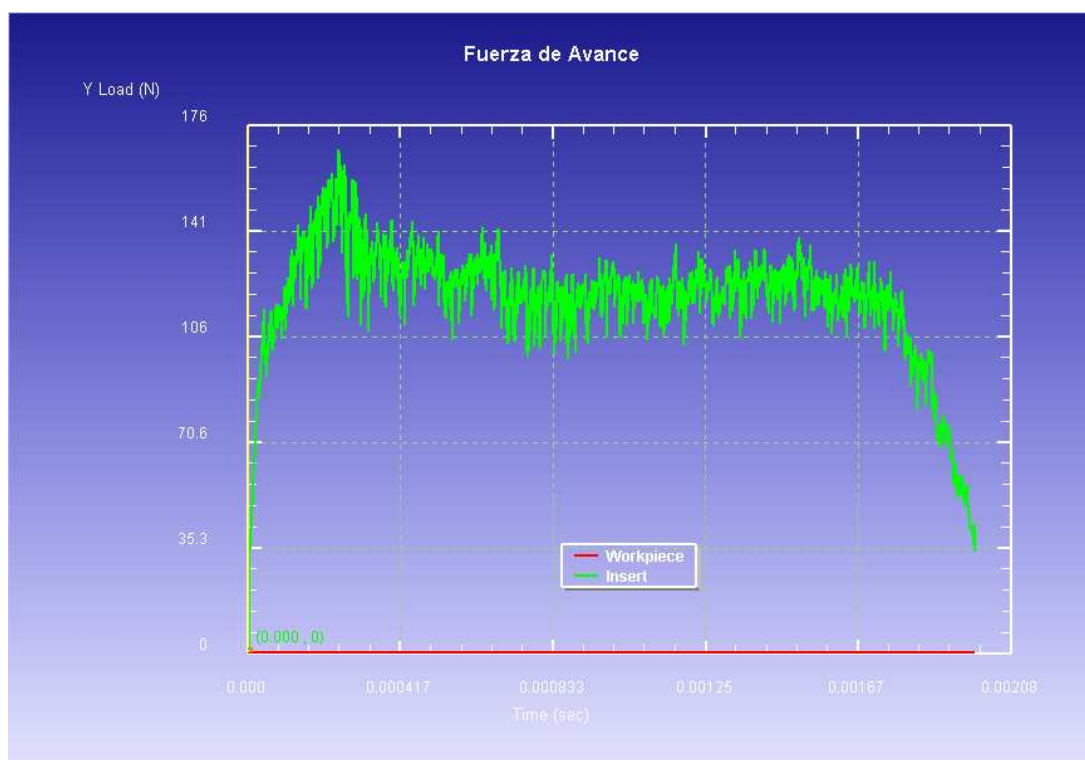
**Figura 31:** Valores de la Fuerza de Corte correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo.

**Tabla 9:** Variación relativa de la Fuerza de Corte obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada.

Radio de filo	Variación relativa de la fuerza de corte al realizar 2 pasadas en lugar de 1
R0	-25%
R2	-24%
R5	-25%
R8	-15%

#### 4.1.4. Fuerza de Avance

La Fuerza de Avance presenta más oscilaciones que la Fuerza de Corte pero aún así también tiende a estabilizarse en el tiempo. En la figura 32 se muestra a modo de ejemplo la gráfica correspondiente a primera pasada en redondeo de filo 0,05mm.

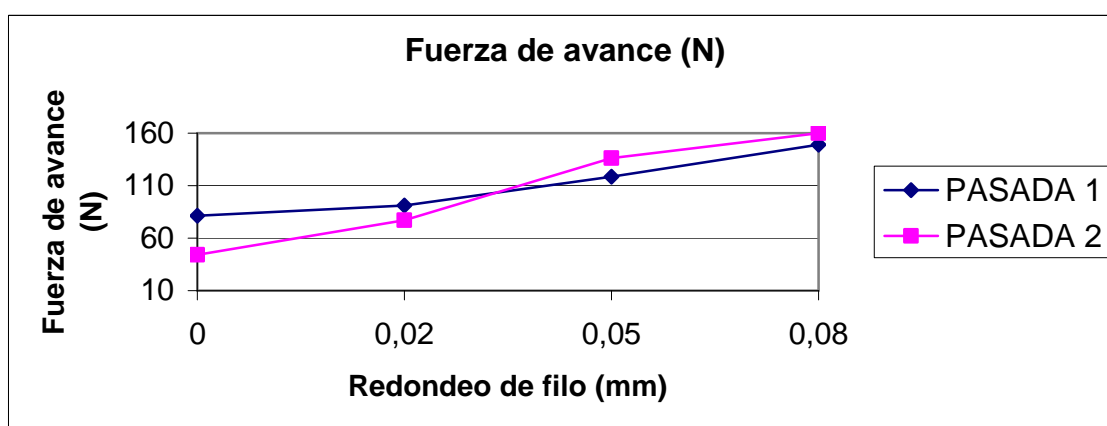


**Figura 32:** Fuerza de Avance correspondiente a la primera pasada de redondeo de filo 0,05mm.

Analizando la figura 33 podemos concluir que la Fuerza de Avance aumenta al aumentar el redondeo de filo en ambas pasadas.



Según muestra la tabla 10 de la Fuerza de Avance, la diferencia al realizar una o dos pasadas es significativa para el caso de arista viva, siendo un 45% mayor el resultado obtenido en la primera pasada respecto a la segunda; en los demás casos las diferencias son menores a pesar de esto no podemos afirmar que los valores obtenidos en primera pasada sean superiores a los de la segunda ya que para redondeos de filo 0,05 y 0,08mm los valores son mayores en la segunda pasada y para arista viva y filo 0,02 los valores son mayores en la primera pasada.



**Figura 33:** Valores de la Fuerza de Avance correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo.

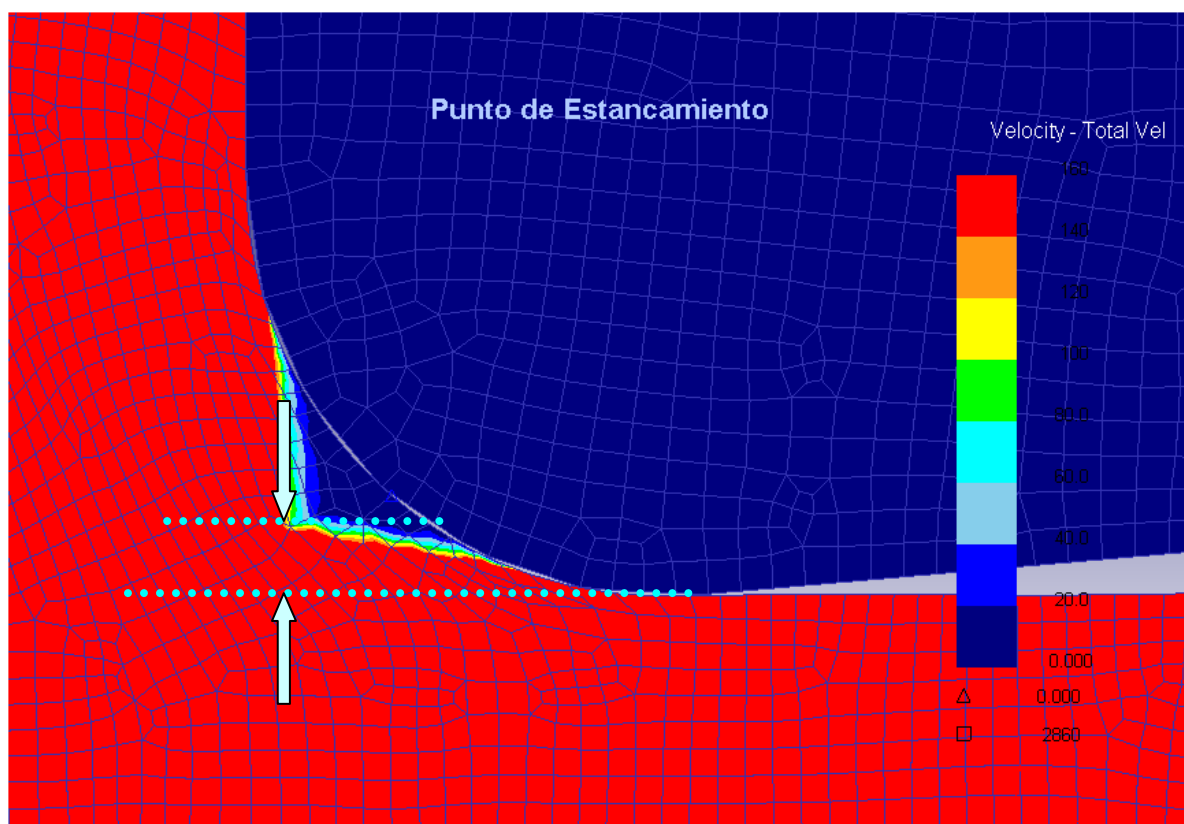
**Tabla 10:** Variación relativa de la Fuerza de Avance obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada.

Radio de filo	Variación relativa de la fuerza de avance al realizar 2 pasadas en lugar de 1
<b>R0</b>	-45%
<b>R2</b>	-15%
<b>R5</b>	15%
<b>R8</b>	7%



#### 4.1.5. Punto de estancamiento

En los procesos de formación de viruta se observa una zona, frente a la superficie de desprendimiento, en la que el material prácticamente no se desplaza respecto de la herramienta. A esta zona se la denomina zona de estancamiento y suele presentar una geometría aproximadamente triangular. En la figura 34 se muestra el campo de velocidades del material. Generalmente se denomina zona de estancamiento a la zona en la cual la velocidad del material es inferior al 2% de la velocidad de corte (4mm/s para la velocidad de corte 2000mm/s considerada en este modelo). Se denomina punto de estancamiento al vértice de la zona de estancamiento opuesto al contacto de la misma con la herramienta y altura del mismo a su cota respecto de la cota de la tangente del filo con la dirección del movimiento de corte (ver figura 34).



**Figura 34:** Altura del punto de estancamiento correspondiente a redondeo de filo 0,08mm en segunda pasada.

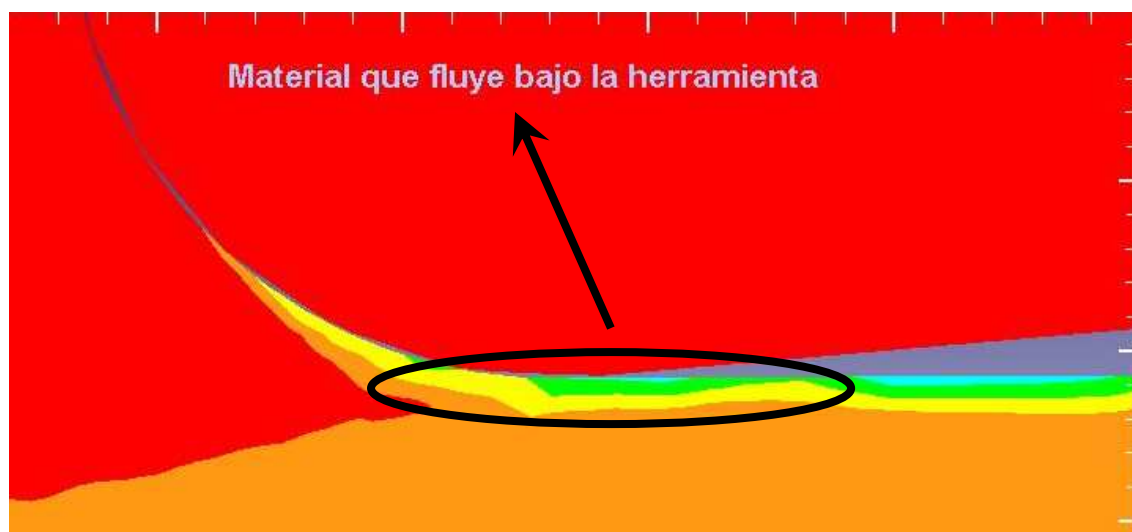
En el proceso de formación de viruta se considera que el material se divide en el punto de estancamiento formando 2 flujos. Parte del material forma la viruta deslizando sobre la superficie de desprendimiento de la herramienta y el resto fluye bajo el filo de la herramienta dando lugar a la superficie mecanizada. Existe una capa de material, de espesor, en principio similar a la altura del punto de estancamiento, que es comprimida para permitir su flujo bajo el filo de la herramienta. La recuperación elástica de dicho material producirá una fuerza de empuje sobre la superficie de incidencia, en la dirección del movimiento de avance, denominada generalmente fuerza de empuje (*ploughing force*). Distintos trabajos de modelización numérica han indicado que dicha fuerza de empuje es fundamental a la hora de explicar las variaciones de las fuerzas obtenidas para determinadas geometrías de arista de corte (principalmente flanco y redondeo de filo) [3].

Para determinar el espesor de la capa de material que provoca la fuerza de empuje indicada se han empleado 2 procedimientos:

1) Determinación de la altura del punto de estancamiento correspondiente a la zona con velocidad de corte inferior a 40mm/s (2% de la velocidad de corte).

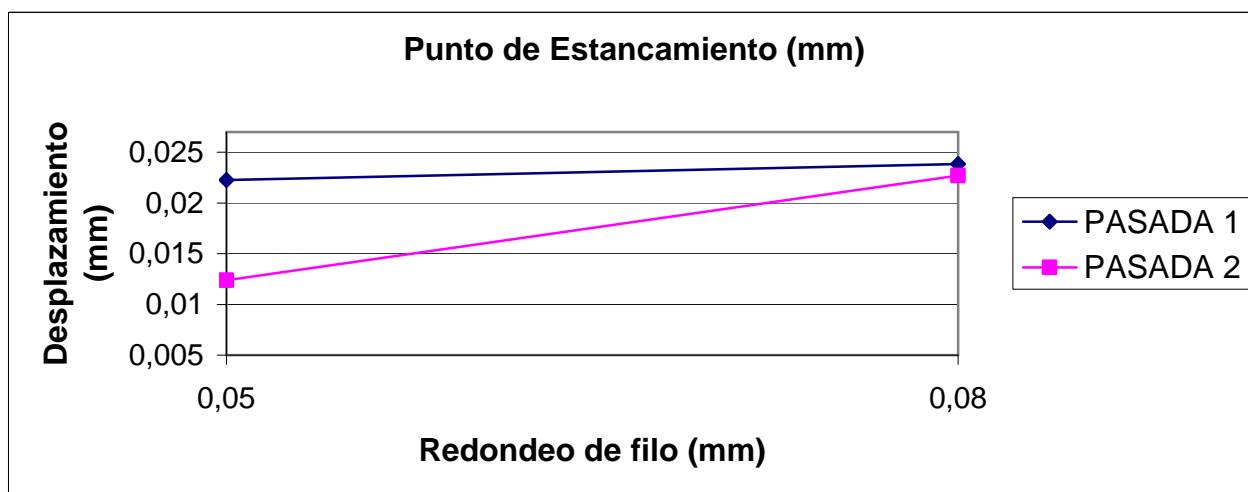
(Ver figura 34)

2) Determinación del desplazamiento máximo en la dirección del avance que han sufrido durante la simulación los elementos de la superficie mecanizada de la pieza (ver figura 35). A esta magnitud se la ha denominado “desplazamiento máximo en superficie mecanizada”.



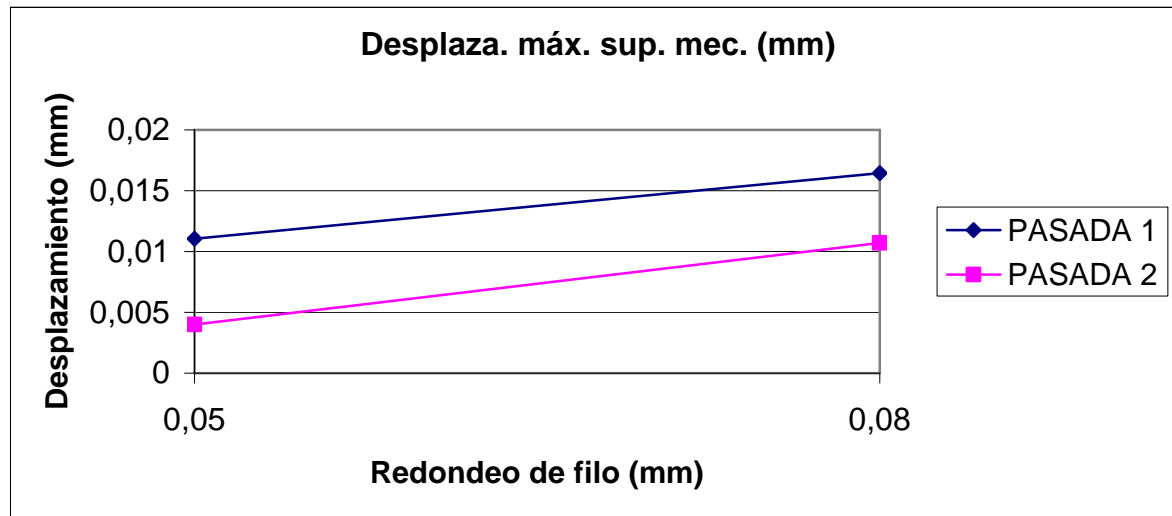
**Figura 35:** Desplazamiento máximo del material en la superficie mecanizada correspondiente a redondeo de filo 0,08mm en segunda pasada.

En la figura 36 se muestran los resultados obtenidos midiendo la altura del punto de estancamiento correspondiente a la zona con velocidad de corte inferior a 40mm/s. Las herramientas de arista viva y redondeo 0,02 mm no las incluimos porque en el caso de arista viva la zona de estancamiento es prácticamente inapreciable y para la herramienta con redondeo de filo 0,02mm la zona de estancamiento es poco estable y la altura del punto de estancamiento es muy pequeña (especialmente en la primera pasada, en la que es del mismo orden que el tamaño de elemento de la malla). Para el redondeo de filo de 0,05mm y 0,08mm se observa un importante incremento de la altura del punto de estancamiento con el redondeo de filo, coherente con los incrementos de fuerza observados para dichas geometrías. Analizando la influencia del número de pasadas se observa que la altura de estancamiento es mucho mayor en la primera pasada para el redondeo 0,05mm, pero se iguala para el redondeo 0,08mm. Este comportamiento distinto es consistente con el distinto tipo de viruta observado en la 2ª pasada con redondeo 0,08mm (viruta serrada) que no se produce para el redondeo 0,05.



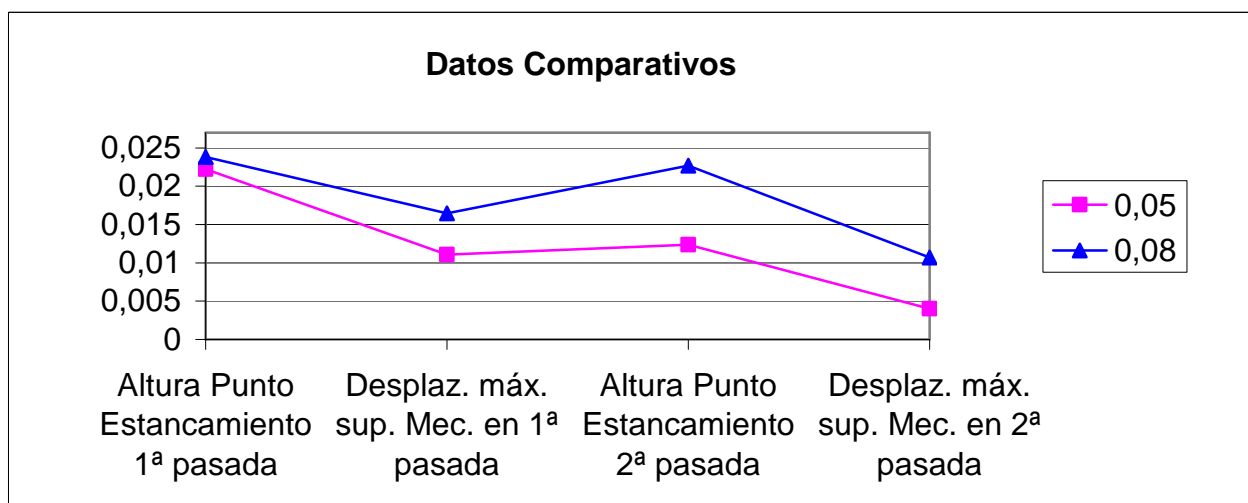
**Figura 36:** Valores de los desplazamientos correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo.

La figura 37 muestra los valores del desplazamiento máximo en la dirección del avance producidos en el material que forma la superficie mecanizada durante la simulación, al igual que en el caso anterior solo se han tenido en cuenta los redondeos de 0,05mm y 0,08mm. Como se puede observar, dicho desplazamiento aumenta al aumentar el redondeo de filo en ambas pasadas. En cuanto a la diferencia entre la primera y la segunda pasada, la diferencia es notable para ambos redondeos de filo, obteniendo valores mayores en la primera pasada.



**Figura 37:** Valores de los desplazamientos en el eje Y correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo.

En la figura 38 se muestran los resultados obtenidos con ambos métodos, correspondientes a las geometrías de filo de 0,05mm, 0,08mm y a la 1ª y 2ª pasada. Los valores obtenidos con el método de la altura del punto de estancamiento son mayores para ambos redondeos de filo que los valores obtenidos con el método del desplazamiento de la superficie mecanizada.



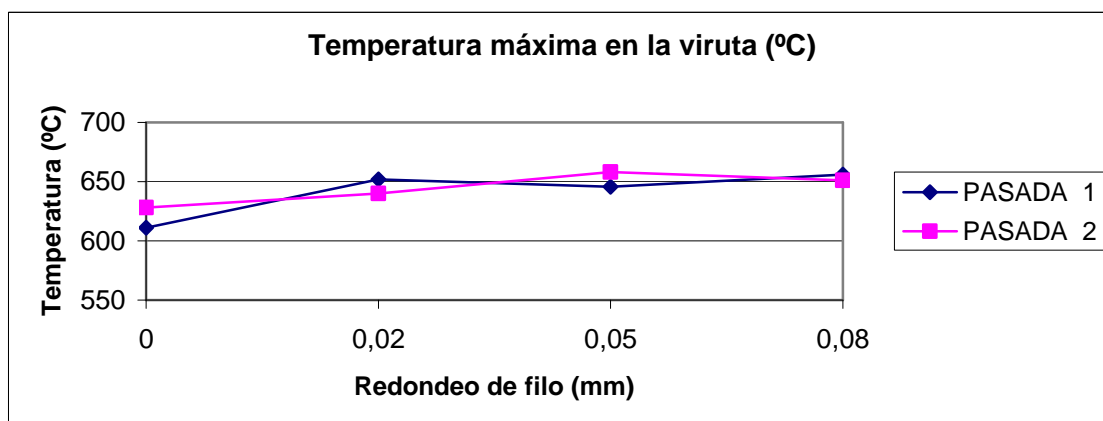
**Figura 38:** Valores comparativos al realizar ambos métodos.

#### 4.1.6. Temperatura máxima de la viruta

La temperatura máxima de la viruta se alcanza en la zona de pérdida de contacto viruta-herramienta.

Tal y como muestra la figura 39 la diferencia de temperatura de la viruta ejecutando la pasada con cualquier redondeo de filo es prácticamente insignificante, el resultado más bajo se obtiene en el caso de arista viva pero todos los valores oscilan en torno a 650°C.

Según indica la tabla 11 la diferencia de realizar una o dos pasadas oscila entre el 0% y el 2%, por lo que podemos concluir que en este caso una segunda pasada no nos aporta información nueva en cuanto a las temperaturas.



**Figura 39:** Valores de la Temperatura máxima en la viruta correspondiente a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo.

**Tabla 11:** Variación relativa de la Temperatura máxima en la viruta obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada.

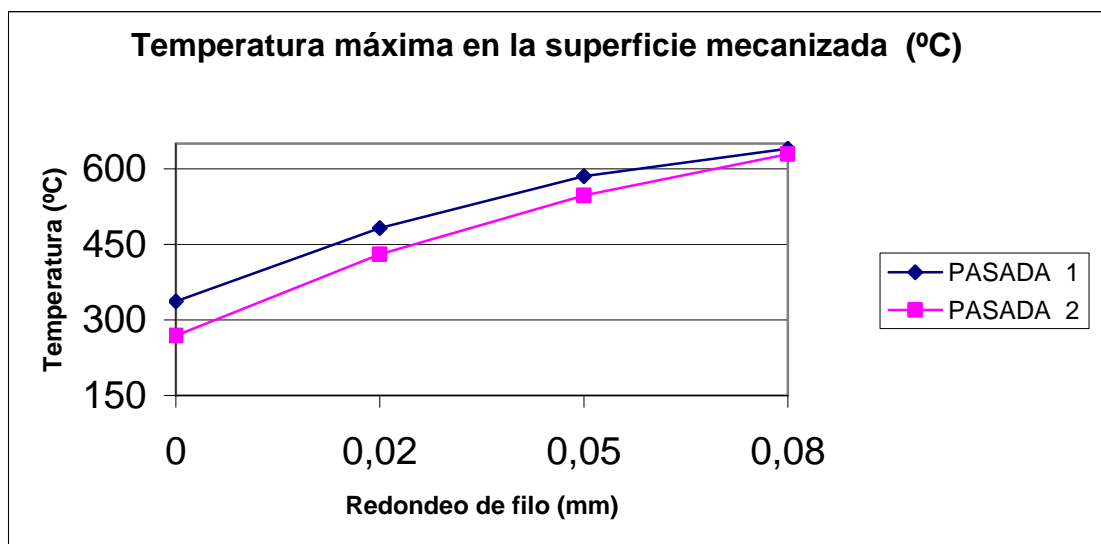
Radio de filo	Variación relativa de la Temperatura al realizar 2 pasadas en lugar de 1
<b>R0</b>	2 %
<b>R2</b>	-1%
<b>R5</b>	2%
<b>R8</b>	-0.7%

#### 4.1.7. Temperatura máxima en la superficie mecanizada

La temperatura máxima en la superficie mecanizada, para todos los redondeos de filo, se alcanza en la zona de tangencia de la arista de corte con la dirección del movimiento de corte.

Como se aprecia en la figura 40 al aumentar el redondeo de filo aumenta la temperatura máxima en la superficie mecanizada de la pieza, desde un valor en torno a 250 °C (para arista viva) hasta los 630°C (para el redondeo de filo máximo).

Según la tabla 12 la diferencia entre realizar una o dos pasadas disminuye al aumentar el radio de filo, es decir para el caso de arista viva los valores obtenidos en primera pasada son un 20% mayores que los de la segunda pasada y para el caso de redondeo de filo 0,08mm la diferencia de valores entre ambas pasadas es un 1% mayor en primera pasada.



**Figura 40:** Valores de la Temperatura máxima en la superficie mecanizada correspondiente a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo.



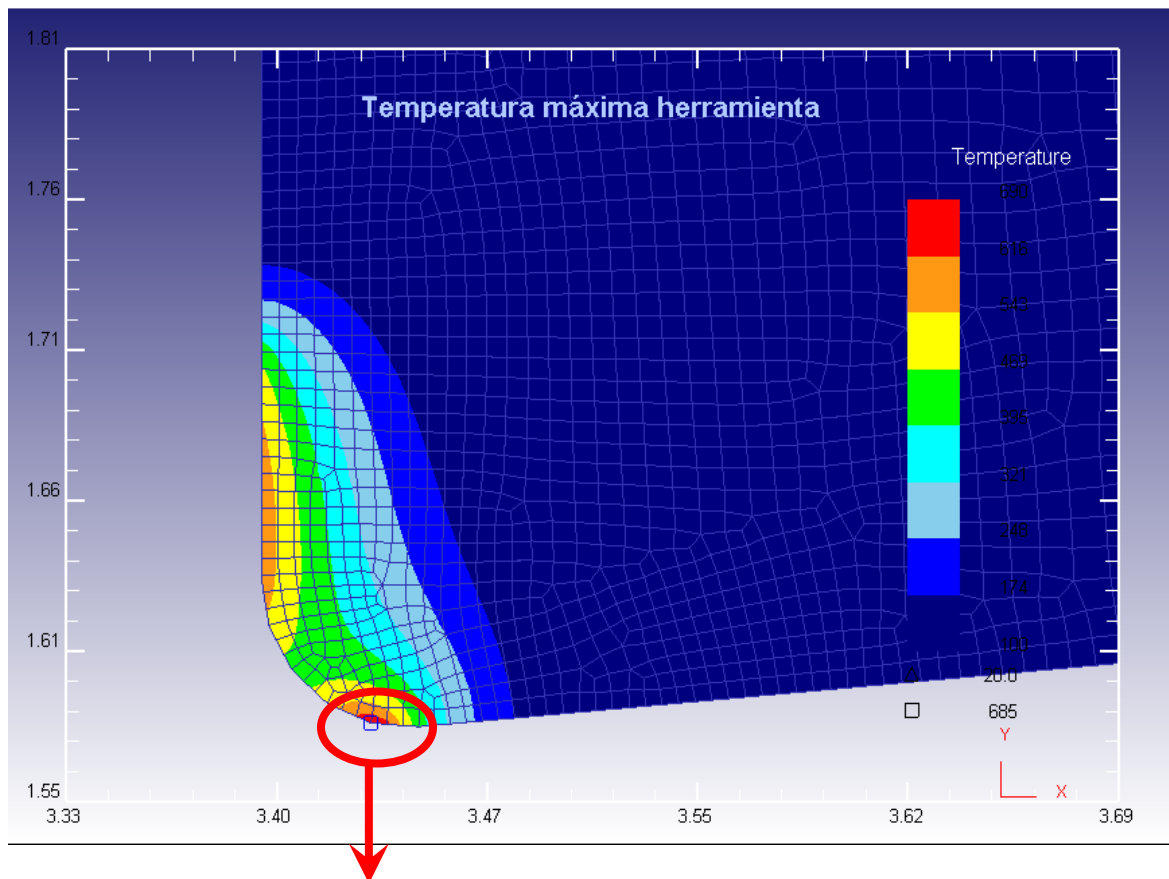
**Tabla 12:** Variación relativa de la Temperatura máxima en la superficie mecanizada obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada.

Radio de filo	Variación relativa de la Temperatura al realizar 2 pasadas en lugar de 1
<b>R0</b>	-20 %
<b>R2</b>	-10 %
<b>R5</b>	-6 %
<b>R8</b>	-1 %

#### **4.1.8. Temperatura máxima en la herramienta**

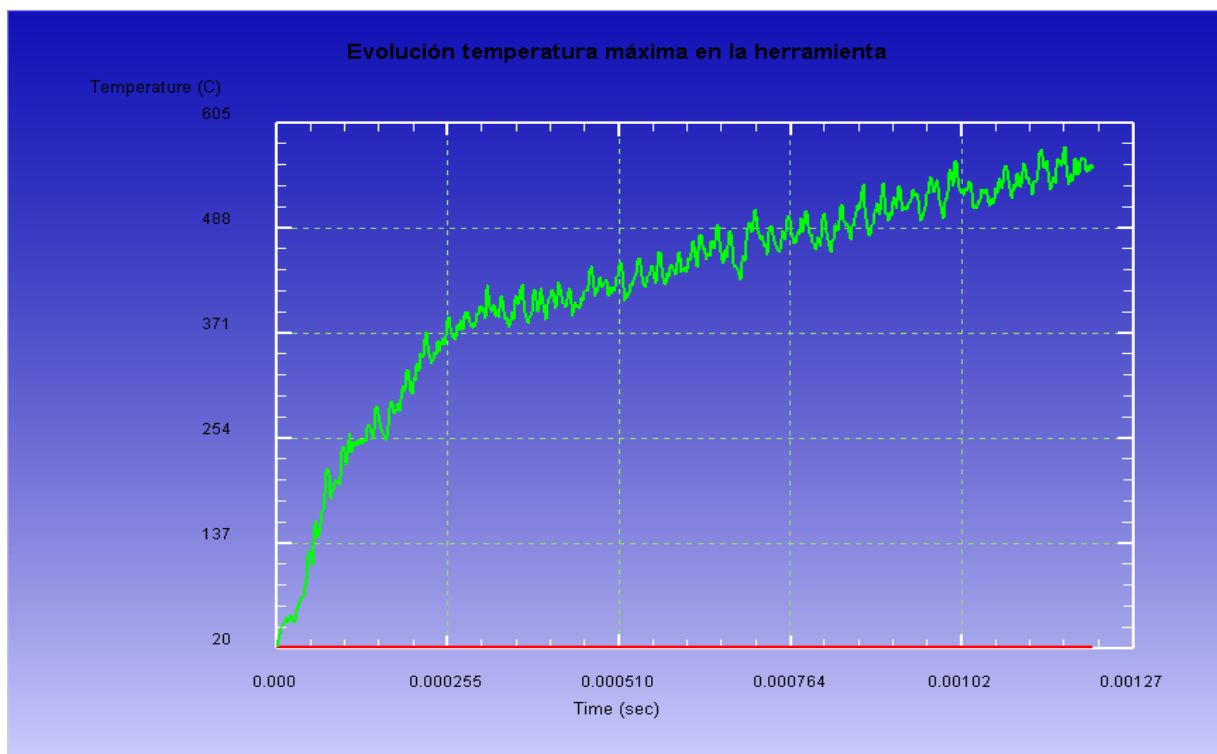
La temperatura máxima en la herramienta, para todos los redondeos de filo, se alcanza en la zona de tangencia de la arista de corte con la dirección del movimiento de corte. (ver figura 41).

La temperatura máxima en la herramienta, ver figura 42, no estabiliza debido a que se simulan pocos milisegundos de corte. Por tanto, los resultados que se dan son orientativos y adecuados para realizar análisis únicamente comparativos.



### TEMPERATURA MÁXIMA HERRAMIENTA

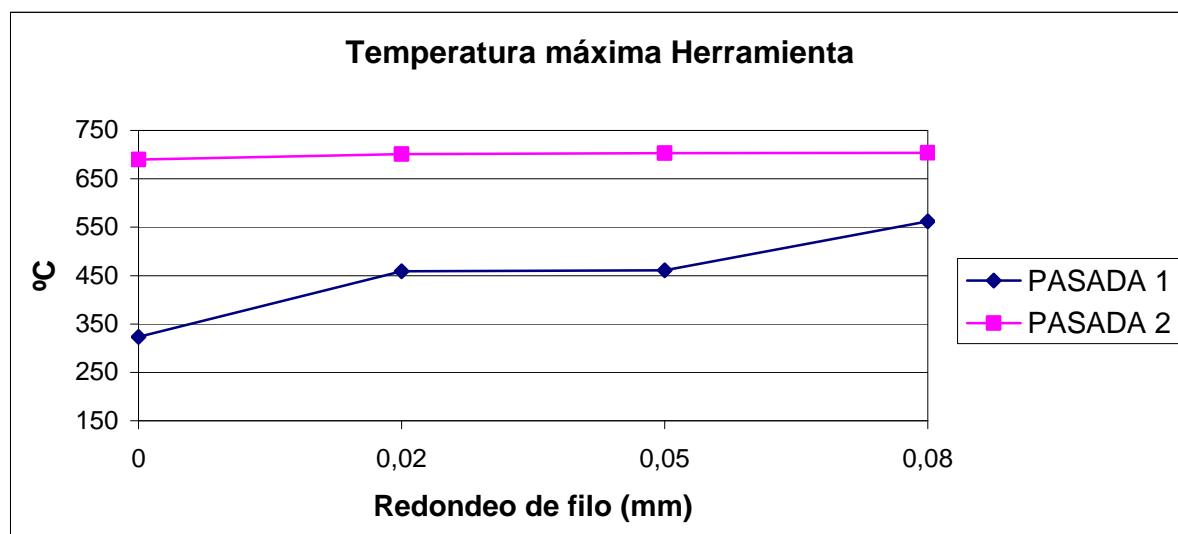
**Figura 41:** Temperatura máxima herramienta correspondiente al caso de redondeo de filo 0,05mm en segunda pasada.



**Figura 42:** Evolución Temperatura máxima en la herramienta en la primera pasada para el redondeo de filo 0,08mm.

En la figura 43 se observa, que al simular una única pasada, la temperatura máxima de la herramienta se incrementa al aumentar el radio de filo. En la simulación de la segunda pasada los valores obtenidos de temperatura máxima en la herramienta son similares para todos los redondeos de filo.

La tabla 13 muestra las diferencias porcentuales entre realizar una pasada o dos pasadas; en el caso de arista viva la temperatura de la herramienta en la segunda pasada es un 53% mayor que en la primera, en los demás casos también hay diferencias entre ambas pasadas que van disminuyendo al aumentar el redondeo de filo.



**Figura 43:** Valores de la Temperatura máxima de la herramienta correspondientes a la 1ª y 2ª pasada para los distintos redondeos de filo.

**Tabla 13:** Variación relativa de la Temperatura máxima de la herramienta obtenida en la simulación de la 2ª pasada de corte en relación con el valor obtenido en la 1ª pasada.

Radio de filo	Variación relativa de la Temperatura al realizar 2 pasadas en lugar de 1
<b>R0</b>	53 %
<b>R2</b>	34 %
<b>R5</b>	34 %
<b>R8</b>	20 %

## CAPÍTULO 5

# 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

## 5.1 Conclusiones

Tras la realización del estudio anteriormente mostrado, podrían obtenerse las siguientes conclusiones:

- Los modelos numéricos de elementos finitos aplicados al análisis de procesos de corte ortogonal permiten reducir el número de ensayos y determinar magnitudes difíciles de medir experimentalmente.
- Se ha confirmado, que en general, simular 1 ó 2 pasadas influye de forma muy significativa en los resultados obtenidos numéricamente para muchas magnitudes termomecánicas. Los valores obtenidos después de 2 pasadas de corte se corresponden con condiciones más parecidas a las que se producen generalmente en los procesos de mecanizado y ensayos de validación de corte ortogonal. Sin embargo, la práctica totalidad de los trabajos basados en modelos numéricos de corte ortogonal consideran la simulación de una única pasada de corte.
- El espesor de viruta obtenido numéricamente disminuye al aumentar el redondeo de filo; los valores obtenidos al realizar la primera pasada son un 50% mayores que los obtenidos en la realización de la segunda pasada.

- Los datos obtenidos midiendo la longitud de contacto viruta-herramienta en la primera pasada van disminuyendo ligeramente al aumentar el redondeo de filo, en la segunda pasada los valores son similares en todos los redondeos de filo. La diferencia entre realizar de una o dos pasadas es significativa, se obtienen valores en torno a un 40- 50% mayores en primera pasada.

- La Fuerza de Corte estabiliza rápidamente para ambas pasadas y para todos los redondeos de filo. Los valores de esta Fuerza, en ambas pasadas, aumentan al aumentar el redondeo de filo, siendo este efecto más notable en el caso de la segunda pasada. Las diferencias porcentuales entre realizar una o dos pasadas oscilan en torno al 25-15%, obteniendo valores mayores en la primera pasada.

- La Fuerza de Avance presenta más oscilaciones que la Fuerza de Corte pero también estabiliza para todos los casos. Al aumentar el redondeo de filo se produce un importante incremento de la Fuerza de Avance, superior al incremento de la Fuerza de Corte. En cuanto a la realización de una o dos pasadas señalamos que para el caso de arista viva y redondeo de filo 0,02mm se obtienen valores mayores en primera pasada, sin embargo para redondeo 0,05mm y 0,08mm los valores obtenidos son mayores en la segunda pasada.

- La medida de la capa de material que provoca la fuerza de empuje sobre la superficie de incidencia aumenta al aumentar el redondeo de filo en ambas pasadas. Analizando la influencia del número de pasadas, según el método del punto de estancamiento, se observa que la altura de estancamiento es mayor en la primera pasada para el redondeo 0,05mm, pero se iguala para el redondeo de 0,08mm.

La medida de esta capa de material se realiza mediante dos métodos distintos, la altura del punto de estancamiento y el desplazamiento máximo de la superficie mecanizada, una clara diferencia entre la realización de ambos métodos es que los valores obtenidos con el método de la altura del punto de estancamiento son mayores que los obtenidos con el método del desplazamiento máximo de la superficie mecanizada para los redondeo de filo 0,05mm y 0,08mm; los redondeos de arista viva y 0,02 mm no se consideran puesto que en estos casos la zona de estancamiento es poco estable y la altura del punto de estancamiento es muy pequeña.

- La Temperatura máxima en la viruta se alcanza en la zona de pérdida de contacto viruta-herramienta. Dicha temperatura no muestra una tendencia al aumentar el redondeo de filo. Las diferencias porcentuales entre realizar una o dos oscilan en torno al 2% entre una pasada y otra.

- La Temperatura máxima en la superficie mecanizada se alcanza para todos los redondeos de filo en la zona de tangencia de la arista de corte con la dirección del movimiento de corte. Los valores de esta Temperatura aumentan al aumentar el redondeo de filo. Las diferencias entre realizar una o dos pasadas van disminuyendo al aumentar el redondeo de filo.

- La Temperatura máxima de la herramienta para todos los redondeos de filo se alcanza en la zona de tangencia de la arista de corte con la dirección del movimiento de corte. Esta temperatura no estabiliza debido a que se simulan pocos milisegundos de corte. Al simular una única pasada, la temperatura máxima de la herramienta se incrementa al aumentar el radio de filo. En la simulación de la segunda pasada, los valores de temperatura máxima en la herramienta obtenidos son similares para todos los redondeos de filo. Las diferencias porcentuales entre realizar una o dos pasadas van disminuyendo al aumentar el redondeo de filo.

## 5.2 Líneas de trabajo futuro

La optimización de un modelo informático, presenta una gran complejidad debido al amplio abanico de posibilidades que ofrece. Es por esta razón que en un futuro podrían realizarse gran variedad de trabajos relacionados con el aquí presentado.

- Extender el análisis a otras geometrías de herramienta (desgaste de flanco, filos con faceta negativa, etc.), a otros parámetros de corte y a otros materiales distintos del acero inoxidable AISI 316L.
- Ajustar el modelo numérico y validarlo experimentalmente empleando la información disponible en la referencia [3].
- Analizar globalmente los resultados numéricos obtenidos para los distintos redondeos de filo para determinar las causas que justifican las variaciones de las distintas magnitudes termomecánicas con la geometría de la herramienta.
- Extender el estudio a un número de pasadas superior a dos para verificar que las variaciones de los resultados obtenidos en la segunda pasada y los obtenidos en las siguientes pasadas son poco relevantes.



## CAPÍTULO 6

### 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Apuntes de la asignatura “Tecnología de Fabricación I” de la Universidad Carlos III de Madrid.

[2] Apuntes de la asignatura “Tecnología de Fabricación II” de la Universidad Carlos III de Madrid.

[3] Tesis doctoral “Análisis Termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de herramientas en los procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos.”

[4] Umbrello et al, 2007